

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE FÍSICA

Afonso Schulz Albrecht



ESTUDO DO SISTEMA DE SEGURANÇA DE  
LASER DA EUROPA COM ÊNFASE NO  
SISTEMA ALEMÃO

Berlin, Alemanha

2015

Afonso Schulz Albrecht

ESTUDO DO SISTEMA DE SEGURANÇA DE LASER DA EUROPA COM ÊNFASE  
NO SISTEMA ALEMÃO

Trabalho de conclusão de curso submetido ao corpo docente da coordenação do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Física com habilitação em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. Jürgen Eichler

Co-orientadores: Prof Dr. Odair Dias Gonçalves

Dipl. Eng. Claudia Schneeweiss

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

2015

Schulz Albrecht, Afonso

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Instituto de Física, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Jurgen Eichler; Co-  
orientadores: Prof. Dr. Odair Dias Gonçalves; Dipl.  
Eng. Claudia Schneeweiss

Afonso Schulz Albrecht

Rio de Janeiro, 30 de janeiro de 2015

ESTUDO DO SISTEMA DE SEGURANÇA DE LASER DA EUROPA COM ÊNFASE  
NO SISTEMA ALEMÃO

---

assinaturas.

---

assinaturas.

---

Odair Dias Gonçalves, D.Sc.

## AGRADECIMENTOS



É difícil agradecer todas as pessoas que de algum modo, nos momentos serenos e ou apreensivos, fizeram ou fazem parte da minha vida, por isso agradeço à todos de coração.

## LISTA DE FIGURAS



FIGURA 1.1 CARTOON <sup>[3]</sup> .....	2
FIGURA 2.1 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO COM FAIXA DE ACORDO COM O DOCUMENTO TROS, TRADUZIDO. <sup>[18]</sup> ...	7
FIGURA 2.2 ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS TRÊS PROCESSOS: (A) EMISSÃO ESPONTÂNEA, (B) EMISSÃO ESTIMULADA, UM DOS PRINCÍPIOS QUE TORNA POSSÍVEL O FUNCIONAMENTO DOS LASERS E (C) ABSORÇÃO <sup>[6]</sup> .....	11
FIGURA 2.3 ELEMENTO INFINITESIMAL DE FLUXO, $dF$ DE UMA ONDA E.M. PLANA VIAJANDO UMA DISTANCIA INFINITESIMAL, $DZ$ ATRAVÉS DO MATERIAL <sup>[7]</sup> .....	14
FIGURA 2.4 (A) ESQUEMAS DE SISTEMAS LASERS COM TRÊS NÍVEIS E (B) COM QUATRO NÍVEIS <sup>[8]</sup> .....	18
FIGURA 2.5 ESQUEMA DA CAVIDADE RESSONANTE DE UM LASER <sup>[7]</sup> .....	20
FIGURA 2.6 DIAGRAMA DE CONFINAMENTO DE CAVIDADE RESSONANTES. A ÁREA BRANCA (ALTAS PERDAS) SÃO ÁREAS ONDE A CONDIÇÃO DE CONFINAMENTO É VIOLADA. JÁ A ÁREA RISCADA (BAIXAS PERDAS) SÃO AQUELAS ONDE A CONDIÇÃO É SATISFEITA. <sup>[9]</sup> .....	22
FIGURA 2.7 EXEMPLO DA GEOMETRIA EM UMA CAVIDADE COM ESPELHOS PLANO PARALELOS .....	23
FIGURA 2.8 EXEMPLO DA GEOMETRIA EM UMA CAVIDADE COM ESPELHOS CONFOCAIS .....	23
FIGURA 2.9 EXEMPLO DA GEOMETRIA EM UMA CAVIDADE COM ESPELHOS CONCÊNTRICOS .....	24
FIGURA 2.11 PROPRIEDADES DA LUZ LASER. <sup>[MARK CSELE, PG 96]</sup> .....	26
FIGURA 2.12 DIVERGÊNCIA DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA PLANA DEVIDO A DIFRAÇÃO .....	28
FIGURA 2.13 (A) BRILHO NO PONTO 0 PARA UMA <b>FORTE GERAL DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS</b> . (B) BRILHO DE UM <b>FEIXE DE LASER</b> DE DIÂMETRO $D$ E DIVERGÊNCIA $\theta$ .....	29
FIGURA 2.14 ILUSTRAÇÃO DA ARQUITETURA DE UM LASER SEMICONDUTOR <sup>[11]</sup> .....	36
FIGURA 2.15 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE LASERS SEMICONDUTORES <sup>[7]</sup> .....	38
FIGURA 2.16 FIGURA MOSTRANDO AS VARIÁVEIS PARA O CALCULAR A DIVERGÊNCIA DO FEIXE DE LASER .....	44
FIGURA 3.1 GEOMETRIA DE REFLEXÃO, REFRAÇÃO, ABSORÇÃO E ESPALHAMENTO <sup>[3]</sup> .....	50
FIGURA 3.2 GEOMETRIA DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO <sup>[3]</sup> .....	51
FIGURA 3.3 REFLECTÂNCIAS NOS PLANOS -S E -P PARA AR E ÁGUA ( $n=1,33$ ) <sup>[3]</sup> .....	54
FIGURA 3.4 ESPECTRO DE ABSORÇÃO DA MELANINA NA PELE E DA HEMOGLOBINA ( $HbO_2$ ) NO SANGUE. PICOS DE ABSORÇÃO DA HEMOGLOBINA SÃO VISTOS EM 280NM, 420NM, 540NM, 580NM, E 600NM. DADOS DE ACORDO COM BOULNOIS (1986) E RETIRADOS DO LIVRO LASER-TISSUE INTERACTIONS DE MARKOLF H. NIEMZ, 3ED <sup>[3]</sup> .....	59
FIGURA 3.5 ESPECTRO DE ABSORÇÃO DA PELE, DA PAREDE AÓRTICA E DA CÓRNEA. NA REGIÃO DO VISÍVEL, A ABSORÇÃO DA PELE É 20-30 VEZES MAIOR QUE O TECIDO DA CÓRNEA. O ESPECTRO DE ABSORÇÃO DA PAREDE AÓRTICA EXIBE SIMILAR PICO COMO O DA HEMOGLOBINA. DADOS DE ACORDO COM PARISH AND ANDERSON (1983), KEIJZER ET AL. (1989), E EICHLER E SEILER (1991) E RETIRADOS DO LIVRO LASER-TISSUE INTERACTIONS DE MARKOLF H. NIEMZ, 3ED <sup>[3]</sup> .....	59
FIGURA 3.6 LEI DE RAYLEIGH DE ESPALHAMENTO PARA LUZ PRÓXIMA DO UV, VISÍVEL E PRÓXIMA DO IR <sup>[3]</sup> .....	61

FIGURA 3.7 FUNÇÃO DE FASE (FUNÇÃO DE PROBABILIDADE) PARA UMA AMOSTRA DE 80MM DA PAREDE AÓRTICA. OS DADOS FORAM FITADOS CONFORME A FUNÇÃO DE HENYEY-GREENSTEIN (OS PARÂMETROS USADOS FORAM: $G=0,945$ E $U=0,071$ ). OS DADOS OBTIDOS ESTÃO DE ACORDO COM YOON ET AL. (1987) <sup>[3]</sup> .....	63
FIGURA 3.8 VISÃO GERAL DE DIFERENTES TIPOS DE INTERAÇÃO LASER-TECIDO, IRRADIÂNCIA E A EXPOSIÇÃO NA QUAL ELES PREDOMINAM. OS CÍRCULOS SÃO APENAS UM NÚMERO ESTIMADO DOS PARÂMETRO DO LASER ASSOCIADO <sup>[13]</sup> .....	65
FIGURA 3.9 TECIDO UTERINO DE UM RATO DE LABORATÓRIO BRANCO COM UM LASER Nd:YAG CW (POTÊNCIA:10W, BAR:80MM) <sup>[3]</sup> .....	68
FIGURA 3.10 DENTE HUMANO VAPORIZADO COM 20 PULSOS DE LASER Er:YAG (DURAÇÃO DE PULSO: 90MS, ENERGIA DO PULSO: 100MJ, TAXA DE REPETIÇÃO: 1HZ) <sup>[3]</sup> .....	68
FIGURA 3.11 DENTE HUMANO CARBONIZADO COM UM LASER DE CO <sub>2</sub> CW (POTÊNCIA: 1W, BAR:1MM) <sup>[3]</sup> .....	69
FIGURA 3.12 DENTE HUMANO DERRETIDO COM 100 PULSOS DE UM LASER Ho:YAG (DURAÇÃO DO PULSO: 3,8MS, ENERGIA DO PULSO: 18MJ, TAXA DE REPETIÇÃO: 1HZ) <sup>[3]</sup> .....	69
FIGURA 3.13 SIMULAÇÃO MOSTRANDO O MOVIMENTOS DOS MONÔMEROS DE PMMA COMO FUNÇÃO DO TEMPO DEVIDO O PROCESSO DE FOTOABLAÇÃO. REPRODUZIDO POR GARRISON E SRINIVASAN (1985) COM A PERMISSÃO DO AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS (1985) <sup>[3]</sup> .....	75
FIGURA 3.14 ESQUEMA ASSOCIANDO OS PROCESSOS FÍSICOS AO COLAPSO ÓPTICO. AS PERCENTAGENS ESTÃO EM VALORES ESTIMADOS DA ENERGIA TRASFERIDA PARA CADA EFEITO (ENERGIA PULSADA INCIDENTE: 100%). A CAVITAÇÃO OCORRE APENAS EM TECIDOS MOLES OU FLUIDOS. EM FLUIDOS, PARTE DA ENERGIA DA CAVITAÇÃO PODE SER CONVERTIDAP PARA A FORMAÇÃO DE JATOS <sup>[3]</sup> .....	77
FIGURA 3.15 DISTINÇÃO DE ABLAÇÃO INDUZIDA POR PLASMA E FOTODISRUÇÃO DE ACORDO COM A DENSIDADE DE ENERGIA APLICADA <sup>[3]</sup> .....	79
FIGURA 3.16 ESCALA DE TEMPO APROXIMADA DE TODOS OS PROCESSOS QUE CONTRIBUEM PARA A FOTODISRUÇÃO. ASSUMIDO UM LASER COM PULSO DE 30PS. NA IMAGEM APARECEM AINDA A SEGUNDA OCORRÊNCIA DA FORMAÇÃO DE JATOS, CAVITAÇÃO E ONDAS DE CHOQUE <sup>[3]</sup> .....	82
FIGURA 4.1 HIERARQUIA DO CONJUNTO DE REGRAS QUE REGEM A ALEMANHA.....	87
FIGURA 5.1 NÍVEL DE PERIGO EM RELAÇÃO A CLASSE DE LASERS DE ACORDO COM A NORMA DIN EM 60825-1:2007 <sup>[10]</sup> .....	97
FIGURA 5.2 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE LASER DE CLASSE 1 <sup>[30]</sup> .....	99
FIGURA 5.3 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE LASER DE CLASSE 1M <sup>[30]</sup> .....	100
FIGURA 5.4 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE LASER DE CLASSE 1M, PODENDO SER UMA OU OUTRA <sup>[30]</sup> .....	102
FIGURA 5.5 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE LASER DE CLASSE 2M <sup>[30]</sup> .....	103
FIGURA 5.6 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE LASER DE CLASSE 3R DE ACORDO COM INTERVALO DE COMPRIMENTOS DE ONDA QUE A PLACA ABRANGE <sup>[30]</sup> .....	106
FIGURA 5.7 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE LASER DE CLASSE 3B PARA LASER QUE EMITE RADIAÇÃO NA FAIXA ESPECTRAL VISÍVEL (A) E A FEIXA ESPECTRAL NÃO-VISÍVEL (B) <sup>[30]</sup> .....	107
FIGURA 5.8 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE LASER DE CLASSE 3B EM RELAÇÃO FEIXA ESPECTRAL DE EMISSÃO DE RADIAÇÃO, NA QUAL A PLACA (A) SE REFERE A EMISSÕES NA FAIXA ESPECTRAL VISÍVEL E A (B) A FAIXA ESPECTRAL NÃO-VISÍVEL <sup>[30]</sup> .....	109
FIGURA 5.9 FIGURA IDENTIFICANDO OS PARÂMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO ANGULAR A DE UMA FONTE DE RADIAÇÃO ARTIFICIAL. ....	114
FIGURA 6.1 POSSÍVEIS PERCURSOS DO FEIXE LASER ATÉ ATINGIR O OLHO. A) RAO DIRETO; B) REFLETIDO; C) RAO REFLETIDO E ESPALHADO. ....	119
FIGURA 6.2 PILOTO OFUSCANDO ATRAVÉS DE PONTEIRO DE LASER. ....	121
FIGURA 6.3 ORDEM DE IMPORTÂNCIA NA QUAL AS MEDIDAS DE PROTEÇÃO DEVEM SER TOMADAS. ....	123
FIGURA 6.4 EXEMPLOS ILUSTRADOS DE POSICIONAMENTO CORRETO E ERRADO DO APARELHO LASER EM RELAÇÃO A ARQUITETURA DA SALA ONDE ELE SE ENCONTRA <sup>[13]</sup> .....	124
FIGURA 6.5 SEPARAÇÃO DE DOIS OU MAIS LASERS EM UMA MESMA SALA <sup>[13]</sup> .....	124
FIGURA 6.6 EXEMPLO DE JANELA MÓVEL PROTETORA DE LASER .....	125
FIGURA 6.7 EXEMPLO DE SALA LASER <sup>[21]</sup> .....	131
FIGURA 6.8 EXEMPLO 2 DE SALA LASER <sup>[21]</sup> .....	131
FIGURA 6.9 PLACAS DE ADVERTÊNCIA PARA A RESTRIÇÃO DE PESSOAS NO LOCAL. ....	132

FIGURA 6.10 A) PLACA INDICANDO O USO DE ÓCULOS DE PROTEÇÃO LASER E B) PLACA INDICANDO A PRESENÇA DE APARELHO LASER NA SALA <sup>[10]</sup> .....	133
FIGURA 6.11 DELIMITAÇÃO TEMPORAL DOS TIPOS DE LASERS PARA SELEÇÃO DOS FILTROS DE PROTEÇÃO DE ACORDO COM A NORMA DIN EN 207 <sup>[26]</sup> .....	140
FIGURA 6.12 ESQUEMA DE EXPLICAÇÃO DA MARCAÇÃO DOS ÓCULOS LASER <sup>[26]</sup> .....	142
FIGURA 6.13 EXEMPLO DE IDENTIFICAÇÃO DE UM ÓCULOS DE PROTEÇÃO LASER AJUSTÁVEL <sup>[26]</sup> .....	143
FIGURA 7.1 CAMINHO DE IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS E MEDIDAS A SEREM TOMADAS <sup>[10]</sup> .....	150
FIGURA 7.2 ESQUEMA SOBRE AS ETAPAS DA AVALIAÇÃO DE RISCO <sup>[13]</sup> .....	151



## LISTA DE TABELAS



TABELA 1.1 DICIONÁRIO CONTEXTUALIZADO COM O OBJETIVO DE EXPLICITAR AS TRADUÇÕES ESCOLHIDAS NO PRESENTE TRABALHO. ....	4
TABELA 2.1 POTÊNCIAS DE LASERS PARA MESMA PERCEPÇÃO DE LUMINOSIDADE.....	30
TABELA 2.2 TABELA DE CRISTAIS ANFITRIÕES E SEUS RESULTANTES COMPRIMENTOS DE ONDA PARA LASER DE ESTADO SÓLIDO .....	33
TABELA 3.1 ÍNDICES DE REFRAÇÃO E REFLECTÂNCIAS PARA A ÁGUA. DADOS DE ACORDO COM HALE E QUERRY (1973).....	55
TABELA 3.2 EFEITOS TÉRMICOS DA RADIAÇÃO LASER. ....	71
TABELA 3.3 TEMPERATURAS CRÍTICAS PARA A NECROSE CELULAR. DADOS DE ACORDO COM HENRIQUES (1947) E EICHER E SEILER (1991). ....	72
TABELA 3.4 LOCALIZAÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS NO TECIDO BIOLÓGICO. ....	73
TABELA 3.5 FOTOABLAÇÃO DE UM TECIDO DA CÓRNEA COM UM LASER EXCÍMERO DE ARF (DURAÇÃO DE PULSO DE 14NS, DENSIDADE DE ENERGIA DE 180MJ/CM <sup>2</sup> ). FOTOGRAFIA DADA PELO DR. BENDE (TÜBINGEN).....	76
TABELA 5.1 TABELA SOBRE EXEMPLOS DE LIMITES DE RADIAÇÃO ACESSÍVEL PARA A CLASSE DE LASER 1 DE DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA CONTÍNUA, CALCULADOS COM $A \leq A_{MIN}$ UTILIZANDO A NORMA DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1): 2008-05. ....	98
TABELA 5.2 TABELA SIMPLIFICADA DOS LIMITES DE EXPOSIÇÃO. ONDE * ONDA CONTÍNUA (POTÊNCIA CONSTANTE EM PELO MENOS 0,25s), ** MODE-LOCKED (EMISSÃO EM PULSOS, SENDO MENORES QUE 10 <sup>-7</sup> s E MAIORES QUE 1ns), *** PULSO (EMISSÕES QUE SEJAM < QUE 0,25s E MAIORES QUE 10 <sup>-7</sup> s) E **** PULSO GIGANTE (EMISSÕES EM PULSO, MENORES QUE 10 <sup>-7</sup> s E MAIORES QUE 1ns). ....	111
TABELA 5.3 DURAÇÃO DE EXPOSIÇÕES EM DIFERENTES APLICAÇÕES LASER. ....	112
TABELA 5.4 TABELA SOBRE OS EFEITOS ADITIVOS DA RADIAÇÃO PARA OLHOS E PELE EM DIFERENTES INTERVALOS DO ESPECTRO.....	113
TABELA 6.1 LIMITES DE RADIAÇÃO PARA PESSOAS OCUPACIONALMENTE EXPOSTAS.....	121
TABELA 6.2 RELAÇÃO DA CLASSE DE LASER E A IMPORTÂNCIA DO USO DE ÓCULOS DE PROTEÇÃO LASER.....	137

## LISTA DE SIGLAS



BG ETEM - *Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse*

ArbSchG - *Arbeitsschutzgesetz*

BetrSichV - *Betriebssicherheitsverordnung*

OStrV - *Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung*

ArbMedVV - *Arbeitsmedizinischen Vorsorge*

GefStoffV - *Gefahrstoffverordnung*

ESTUDO DO SISTEMA DE SEGURANÇA DE LASER DA EUROPA COM ÊNFASE  
NO SISTEMA ALEMÃO

ALBRECHT, Afonso Schulz. **Estudo do sistema de segurança de laser da europa com ênfase no sistema alemão**. Berlin, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Física (Física Médica) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

## RESUMO



Laser tem expandido sua aplicabilidade e exibe características únicas comparado com outras fontes de luz. A extraordinária rápida evolução dos lasers na medicina ocorreu em quatro décadas e muito desenvolvimento é ainda visto hoje. Com estes desenvolvimentos, precisa-se buscar um maior entendimento da operação dos equipamentos lasers, da interação do feixe óptica com os tecidos humanos, os perigos associados com o uso e medidas de proteção contra possíveis danos que podem ser gerados

A Europa atualmente, principalmente Alemanha, conta com um sistema de leis estruturado em um sentido que garante o uso adequado do aparelho laser, assim como medidas de proteção contra os riscos gerados frente aos trabalhadores. Não obstante, há a exigência de equipes qualificadas e ambientes de trabalho bem estruturados do ponto de vista organizacional. Todos pontos são juridicamente comprovados através da avaliação de risco, que mostra o levantamento de todos os dados do laser, assim como da equipe e do serviço. O Brasil não dispõe de atualmente de um conjunto claro de regras na área laser e, devido ao grande crescimento do sistema, a necessidade de seguir os mesmo passos que a Europa usa nesta área é primordial.

## ABSTRACT



Laser has been expanding its applicability and displays unique features compared to other light sources. The extraordinarily rapid evolution of lasers in medicine has occurred over four decades and much development is still seen today. Along with these developments, one needs to seek a greater understanding of the operation of the laser equipment, the optical beam interaction with human tissues, the hazards associated with the use and protection measures against possible damage that can be generated.

Europe currently, especially Germany, has a system of laws structured in a way that ensures the proper use of the laser device, as well as protective measures against the risks onto the workers. Nevertheless, there is much demand for qualified staff and structured working environment from an organizational point of view. All points are legally proven through the risk assessment, which contains the survey of all laser data, as well as the staff and service. Brazil does not have a clear set of rules in the laser area and, because of the growth of this system, the need to follow the same steps that Europe uses in this area is paramount.

# SUMÁRIO



<b>1</b>	<b>Capítulo - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Dicionário contextualizado .....	4
<b>2</b>	<b>Capítulo – Fundamentos Físicos.....</b>	<b>5</b>
2.1	Conceitos físicos introdutórios .....	6
2.1.1	Espectro eletromagnético e radiação óptica .....	6
2.1.2	Processos de mudança de níveis .....	7
2.1.2.1	<i>Emissão Espontânea (radioativa) e não-radioativa</i> .....	7
2.1.2.2	<i>Emissão Estimulada</i> .....	9
2.1.2.3	<i>Absorção</i> .....	10
2.2	Estrutura do laser e funcionamento .....	12
2.2.1	Meio ativo .....	13
2.2.2	Bombeamento e a inversão de população.....	15
2.2.2.1	Esquemas de bombeamento (Pumping Schemes) .....	16
2.2.2.2	<i>Laser de três níveis</i> .....	17
2.2.2.3	<i>Laser de quatro níveis</i> .....	18
2.2.3	Cavidade ressonante ou óptica e ganho.....	19
2.2.3.1	Cavidades ópticas: Casos especiais importantes.....	22
2.2.3.2	Perdas em cavidades ópticas .....	24
2.3	Propriedades do feixe de laser.....	25
2.3.1	Monocromaticidade .....	26
2.3.2	Coerência.....	27
2.3.3	Direcionalidade.....	27
2.3.4	Brilho .....	28
2.3.5	Curto tempo de duração .....	30
2.4	Tipos de lasers .....	31
2.4.1	Laser de estado sólido.....	32
2.4.1.1	Meio ativo .....	32

2.4.1.2	Técnicas de bombeamento .....	33
2.4.2	Laser diodo semiconductor .....	34
2.4.2.1	Meio ativo .....	35
2.4.2.2	Técnicas de bombeamento .....	36
2.4.2.3	Operação .....	37
2.5	Fundamentos matemáticos .....	39
2.5.1	Relação de conversão de medidas de ângulos .....	39
2.5.2	Energias e potências lasers .....	40
2.5.2.1	Energia .....	40
2.5.2.2	Potência .....	41
2.5.3	Parâmetros de radiação geométrica .....	42
2.5.4	Medida de divergência da radiação de lasers .....	43
2.5.5	Distância de segurança (NOHD) .....	44
2.5.6	Exemplos de cálculos .....	45
<b>3</b>	<b>Capítulo – Fundamentos biológicos .....</b>	<b>48</b>
3.1	Características ópticas dos tecidos .....	49
3.1.1	Reflexão e refração .....	50
3.1.2	Absorção .....	56
3.1.3	Espalhamento .....	60
3.2	Mecanismos de interação da radiação laser .....	64
3.2.1	Efeito fotoquímico .....	66
3.2.2	Efeito térmico .....	67
3.2.3	Fotoablação .....	74
3.2.4	Colapso óptico e ablação tecidual .....	76
3.2.4.1	Ablação induzida por plasma .....	79
3.2.4.2	Fotodisrupção .....	80
3.3	Perigos para os tecidos .....	83
3.3.1	Perigos dos olhos .....	83
3.3.2	Perigos da pele .....	84
<b>4</b>	<b>Capítulo – Base de regulamentos e regras técnicas .....</b>	<b>86</b>
4.1	Base do regulamento jurídico .....	87
4.1.1	Diretriz Européia .....	87
4.1.2	Legislações .....	88
4.2	Regras técnicas .....	89
4.2.1	Regulamentações .....	89
4.2.2	Associações profissionais .....	92

4.2.3	Regras e informações de associações profissionais.....	92
4.2.4	Normas.....	94
4.3	Informações Adicionais.....	94
4.3.1	Infrações .....	95
<b>5</b>	<b>Capítulo – Classe de laser e valores limites .....</b>	<b>96</b>
5.1	Classes de lasers.....	97
5.1.1	Laser Classe 1 .....	98
5.1.2	Laser Classe 1M.....	99
5.1.3	Laser Classe 1C.....	100
5.1.4	Laser Classe 2 .....	101
5.1.5	Laser Classe 2M.....	102
5.1.6	Laser Classe 3A (aplicado até março de 1997) .....	104
5.1.7	Laser Classe 3R.....	104
5.1.8	Laser Classe 3B.....	106
5.1.9	Laser Classe 4 .....	108
5.2	Valores Limites .....	109
5.2.1	Limites de radiação acessível.....	109
5.2.2	Limites de exposição para olhos e pele .....	110
5.2.2.1	Duração de exposições relevantes .....	112
5.2.2.2	Radiação com diversos comprimentos de onda.....	112
5.2.2.3	Determinação do fator de correção $C_E$ .....	114
5.2.3	Exemplos de determinação de alguns limites de exposição .....	115
<b>6</b>	<b>Capítulo – Perigos e medidas de proteção .....</b>	<b>118</b>
6.1	Perigos através da radiação laser.....	119
6.1.1	Perigos diretos .....	119
6.1.2	Perigos indiretos.....	120
6.2	Medidas de proteção .....	122
6.2.1	Medidas de Proteção técnicas.....	123
6.2.1.1	Correto posicionamento do aparelho laser.....	124
6.2.1.2	Delimitação da sala de operação .....	125
6.2.1.3	Medidas de proteção pelo fabricante .....	126
6.2.2	Medidas de Proteção organizacionais .....	126
6.2.2.1	Técnico de proteção laser nível 2 .....	127
6.2.2.2	Identificação da área de operação .....	130
6.2.2.3	Ensino.....	133
6.2.2.4	Restrições.....	136



6.2.3	Medidas de Proteção Pessoais .....	137
6.2.3.1	Óculos de proteção laser .....	137
6.2.3.2	Roupas da proteção laser .....	145
6.2.4	Instruções de operação .....	145
6.2.5	Exemplos de determinação do tipo de óculos de proteção .....	148
<b>7</b>	<b>Capítulo - Avaliação de risco .....</b>	<b>150</b>
7.1	Fundamentos da avaliação de risco .....	152
7.1.1	Responsável pela avaliação de risco .....	152
7.1.2	Determinação dos limites de exposição .....	153
7.1.3	Definição de Perigo, Ameaça e Risco .....	154
7.1.4	Visão geral dos fatores de ameaça .....	154
7.1.5	Substituição .....	157
7.1.6	Estados de funcionamento .....	158
7.1.7	Cuidados da saúde ocupacional .....	158
7.2	Estrutura da avaliação de risco .....	159
7.2.1	Etapas do processo da avaliação de risco .....	159
7.2.2	Aquisição de informações .....	160
7.2.3	Implementação .....	160
7.2.4	Reavaliação .....	161
7.2.5	Considerações de pessoas vulneráveis .....	162
7.2.6	Documentação .....	163
<b>8</b>	<b>Capítulo – Tarefas e responsabilidades do técnico de segurança de laser nível 2</b>	<b>164</b>
8.1	Tarefas e responsabilidades do técnico de segurança laser .....	164
<b>9</b>	<b>Capítulo – Conclusões .....</b>	<b>168</b>
<b>10</b>	<b>Capítulo – Anexos .....</b>	<b>170</b>
10.1	Anexo A – Decreto para a proteção dos trabalhadores contra os perigos da irradiação óptica artificial (decreto dos trabalhadores relacionado a irradiação óptica artificial - OStrV) .....	170
10.2	Anexo B – Formulário de contratação de um técnico de segurança laser nível 2 .....	178
10.3	Anexo C – Instruções de operação .....	180
10.4	Anexo D – Tabelas de cálculos .....	182
10.5	Anexo E – Exemplo de avaliação de risco .....	2
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>1</b>



# 1 CAPÍTULO - INTRODUÇÃO



O laser é um dispositivo que produz radiação eletromagnética, entre suas características principais estão: uma *radiação monocromática*, isto é, possui comprimento de onda bem definido; *coerente*, todos os fótons que compõe o feixe estão em fase, e *colimada*, propaga-se como um feixe de ondas praticamente paralelas. Estas características, entre outras, proporcionaram aos lasers uma ampla aplicabilidade em muitos campos da ciência e tecnologia. O laser se tornou um importante instrumento, não apenas em pesquisas físicas, mas também entre todos os campos da vida diária. Aproximadamente após 60 anos do primeiro experimento realizado com laser, ele deve ser referido como uma das invenções mais significativas do século 20 <sup>[1]</sup>. Ao longo deste trabalho será mostrado a física por trás dos aparelhos lasers, assim como os danos que podem ser causados aos tecidos biológicos e, como objetivo principal, as medidas de proteção que devem ser tomadas para suprimir o máximo possível os riscos associados ao aparelho laser.

A grande aplicabilidade da óptica hoje em dia deve-se, bastante, à existência do feixe de laser. Funcionando como fonte de luz de características únicas, o laser possui propriedades especiais que o tornam um excelente instrumento de uso científico e tecnológico<sup>[1]</sup>. Além da grande aplicabilidade na área física, seu uso vem crescendo de modo acelerado na medicina. Utilizado na medicina desde os anos de

1960, o laser é, atualmente, umas das tecnologias mais empregadas em tratamentos dermatológicos. A evolução extraordinariamente rápida dos lasers na medicina e cirurgia ocorreu dentro de quatro décadas, desde que o primeiro laser de rubi foi usado no tratamento de doenças cutâneas. Nos anos de 1960 e 1970, o argônio e o laser de CO<sub>2</sub> de onda contínua (CW) foram usados para cortar e coagular lesões superficiais e suas organelas [2].

Como escrito anteriormente, os lasers começaram por volta do final dos anos 60 na área médica. E hoje, uma vasta variedade de procedimentos médicos são feitos em todo o mundo. A maioria destes, pertencentes a família de cirurgias minimamente invasivas, um termo que se refere a procedimentos cirurgicos sem contato e sangue. Porém estas duas características têm promovido o laser a ser um bisturi universal e auxiliar de tratamentos. Muitos pacientes e cirurgiões, como ilustrado na figura 1.1, acreditaram que o laser fosse um tipo de instrumento maravilhoso. Esta atitude provocou declarações enganosas e, conseqüentemente, esperas injustificáveis. Um julgamento cuidadoso sobre as mais novas tecnologias é sempre apropriado e cada cura relatada induzida por laser não pode ser tomada como garantida até que sejam feitos estudos independentes que confirmem tal ação [3]. Então, é notório que o laser trouxe consigo riscos e efeitos colaterais que não devem ser descartados.



Figura 1.1 Cartoon [3].

A Europa atualmente apresenta uma série de controles de segurança para a utilização do laser. Em especial, a Alemanha conta com uma sólida hierarquia de regras sobre as quais todos os laser e cuidados associados devem ser garantidos. Entre os procedimentos de segurança, está a avaliação de risco (tratada nesse trabalho) que avalia todo o local de operação do laser, assim como qualificação do grupo que opera o instrumento, medidas de proteção que reduzam ao máximo qualquer exposição não planejada, e demais informações relevantes sobre a segurança de todas pessoas relacionadas.

Assim como os demais países, o Brasil têm tido, também, avanços em seu nível tecnológico relacionado a área laser. E como consequência, também está sujeitos aos riscos que o laser está associado. Atualmente, no Brasil não há bases sólidas tanto sobre a regulamentação de aparelhos lasers como de proteção contra os riscos associados ao aparelho e sua operação.

O objetivo deste trabalho é, então, abordar as bases físicas e biológicas dos lasers, como funcionam e interagem com os tecidos humanos, e as regras de segurança que vigoram na Europa, com foco na Alemanha. E como consequência, uma futura implantação de regras no Brasil, de modo a assegurar à população brasileira uma qualidade maior, padronizada e com menos riscos na área de aplicações lasers.



## 1.1 DICIONÁRIO CONTEXTUALIZADO

O trabalho foi baseado nos sistema de regras aplicado na europa com foco na Alemanha, consequentemente exigindo uma tradução para o português. Para isso foi necessário um breve dicionário para que pudesse explicitar quais foram as traduções escolhidas para as palavras que serão mais utilizadas no decorrer deste trabalho. Para a escolha das seguintes palavras foi relevado, fundamentalmente, o contexto em que se encontram. O objetivo foi alcançar uma definição mais próxima o possível para que ambas palavras expressassem o mesmo significado tanto para falantes alemães quanto para falantes portugueses no contexto tratado. Seguem as palavras no quadro abaixo:

<i>Alemão</i>	<i>Português</i>
<i>Bestrahlungsstärke</i>	Intensidade
<i>Expositionsgrenzwerte</i>	Limites de exposição
<i>Fachkenntnissen</i>	Especialização nível 2
<i>Fachkundige</i>	Pessoa especializada nível 2
<i>Gefährdungen</i>	Perigos
<i>Gefährdungsbeurteilung</i>	Avaliação de risco
<i>Laserschutzbeauftragter</i>	Técnico de proteção laser
<i>Sachkenntnissen</i>	Especialização nível 1
<i>Sachkunde</i>	Pessoa especializada nível 1
<i>Schutzmassnahmen</i>	Medidas de proteção
<i>Stand der Technik</i>	Nível tecnológico
<i>Strahldichte</i>	Densidade de radiação
<i>Verordnung</i>	Decreto

Tabela 1.1 Dicionário contextualizado com o objetivo de explicitar as traduções escolhidas no presente trabalho.

## 2 CAPÍTULO – FUNDAMENTOS FÍSICOS



Nesse capítulo introdutório será apresentado as bases física matemáticas por trás dos lasers. Será abordado conceitos fundamentais para que se consiga um feixe laser, abrangendo pontos cruciais, como características e alguns cálculos sobre os parâmetros associados ao feixe.

A palavra laser é o acrônimo no inglês de “light amplification by stimulated emission of radiation, ou seja, no português amplificação da luz por emissão estimulada de radiação <sup>[4]</sup>. O conceito de emissão estimulada já havia sido introduzido por Einstein em 1917. Embora apenas em 1960 houve a criação de um laser na prática <sup>[4]</sup>.



## 2.1 CONCEITOS FÍSICOS INTRODUTÓRIOS

Será abordado inicialmente dois conceitos introdutórios de grande relevância, o primeiro é o espectro eletromagnético, identificando todas as regiões e seus limites. O conhecimento dos limites do espectro será um dos pontos-chave deste trabalho pois tanto os efeitos da radiação laser sobre a pele quanto as leis e cálculos que serão feitos mais adiante, irão exigir um conhecimento sobre qual região do espectro eletromagnético está em questão. Como segundo conceito introdutório, são as mudanças de níveis em um átomo, na qual uma das mudanças (emissão estimulada) é um dos efeitos mais fundamentais no funcionamento laser.

### 2.1.1 *ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E RADIAÇÃO ÓPTICA*

Radiação óptica é qualquer onda eletromagnética na gama de comprimento de onda de 100 nanômetros a 1 milímetro. O espectro da radiação óptica é dividido em radiação ultravioleta, radiação visível e radiação infravermelha. A radiação óptica artificial, no contexto deste trabalho, entende-se por qualquer radiação óptica emitida por fontes artificiais (exemplo laser.) <sup>[17]</sup>. Radiação óptica é dividida de acordo com a ICNIRP (Internacional Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) em <sup>[6]</sup>:

- ◆ Radiação ultravioleta (UV) é a radiação não-ionizante com comprimento de onda entre 400 a 100 nm. A UV é subdividida em UVA (400–315 nm), UVB (315–280 nm) e UVC (280–100 nm).
- ◆ Radiação visível é a radiação não-ionizante com comprimento de onda entre 380 a 780 nm, porém não há bordas bem definidas. Fontes naturais que produzem radiação visível são sol e o fogo e entre as fontes artificiais são lâmpadas, displays, lasers...



- ♦ Radiação Infravermelha é a banda do espectro de radiação eletromagnética entre 780 nm a 1 mm. A radiação infravermelha é subdividida em IR-A (780 nm-1.4  $\mu$ m), IR-B (1.4-3  $\mu$ m) e IR-C (3  $\mu$ m-1 mm).

A figura 2.1 esquematiza essa classificação.

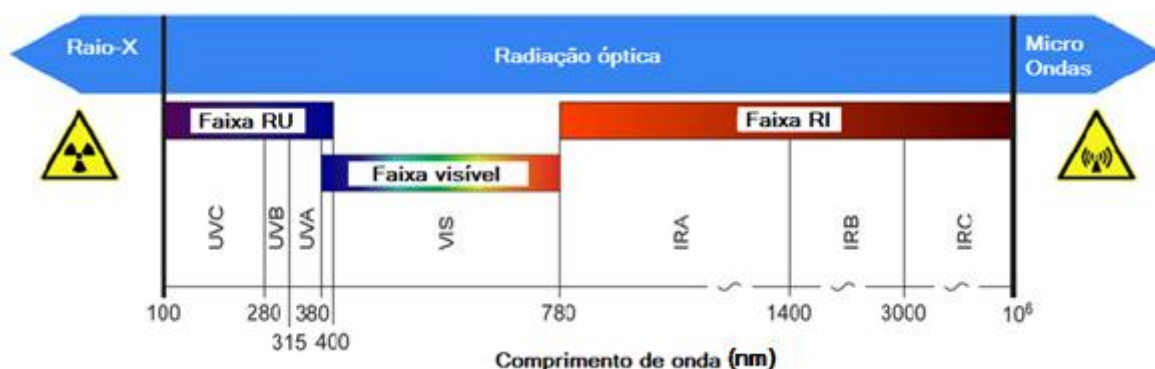


Figura 2.1 Espectro eletromagnético com faixa de acordo com o documento TROS, traduzido.<sup>[18]</sup>

## 2.1.2 PROCESSOS DE MUDANÇA DE NÍVEIS

Estes conceitos de mudanças de níveis são uma das principais idéias por trás do funcionamento dos lasers e serão introduzidas brevemente nesta parte do trabalho para que nos pontos seguintes possam ser apresentados mais claramente como um laser funciona passo a passo.

### 2.1.2.1 Emissão Espontânea (radioativa) e não-radioativa

Para descrever o fenômeno de emissão espontânea, vamos considerar dois níveis de energia, 1 e 2, de algum átomo ou molécula de um dado material, suas energias sendo  $E_1$  e  $E_2$ , ( $E_1 < E_2$ ) (Figura 2.3 a). Acima de qualquer discussão a

respeito, ambos os níveis podem ser qualquer conjuntos de níveis infinitos possuídos pelo átomo. Contudo, é conveniente então tomar o nível  $E_1$  como estado fundamental. Assumindo que, inicialmente o átomo esteja no estado de maior energia  $E_2$ , ele tende a decair, emitindo uma energia correspondente a diferença de  $E_2 - E_1$ . Note, porém que essa emissão é apenas uma das duas possibilidades do átomo decair <sup>[6]</sup>. A outra possibilidade do átomo decair é por emissão estimulada, abordada no próximo ponto, 2.1.2.3.

O átomo que se encontra no estado excitado, irá decair após um certo tempo para o estado fundamental. Esse processo ocorre sem o átomo ter sido submetido a nenhum tipo de radiação, e assim emitindo um fóton de energia  $h\nu$  <sup>[4]</sup>. A frequência  $\nu_0$  da onda irradiada é dada pela seguinte equação <sup>[6]</sup>:

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2.1.1)$$

Onde:

$h$             Constante de Plack.

Geralmente o tempo que os átomos permanecem no estado excitado antes de voltarem ao estado fundamental é chamado de tempo de vida, da ordem de  $10^{-8}$ s, porém varia do estado excitado. Estes estados, chamados metaestáveis, são importantes para o funcionamento dos lasers. Como será visto mais a frente em relação em relação aos lasers de três e quatro níveis. <sup>[4]</sup>

A probabilidade para esse processo ocorrer por ser definido pela taxa de decaimento da população no final de energia mais alto,  $(dN_2/dt)_{sp}$ , deve ser proporcional a população  $N_2$ . Por isso, podemos escrever <sup>[6]</sup>:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -AN_2 \quad (2.1.2)$$

Onde:

## A Emissão espontânea.

O sinal de menos vem do fato da derivada em relação ao tempo ser negativa. A quantidade  $\tau_{sp} = 1/A$  é chamada tempo de vida da emissão espontânea. Assim, podemos escrever para emissões não-radioativas [6]:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{nr} = -\frac{N_2}{\tau_{nr}} \quad (2.1.3)$$

### 2.1.2.2 Emissão Estimulada

Vamos supor agora que o átomo se encontra novamente no nível 2 e uma onda eletromagnética de frequência  $\nu=\nu_0$  (como por exemplo igual a onda emitida na emissão espontânea do ponto anterior 2.1.2.2) é incidente no material (Figura 2.3 b). Desde que essa onda tenha mesma frequência atômica, há uma certa probabilidade que esta onda irá forçar o átomo à transição 2 para 1. Neste caso a diferença de energia  $E_2-E_1$  é somada à energia da onda incidente [7].

Há uma fundamental diferença entre os processos de emissão espontânea e estimulada. No caso da emissão espontânea, o átomo emite uma onda eletromagnética que não tem relação de fase com a onda emitida por outro átomo. Além do mais, a onda pode ser emitida em qualquer direção. No caso da emissão estimulada, sendo o processo forçado pela onda eletromagnética incidente, a emissão de qualquer átomo será com a mesma fase e direção da onda incidente [5]. Ou seja, o fóton emitido pelo átomo na emissão estimulada é igual, sob todos os aspectos, a fóton que estimulou primeiramente o átomo [4]. Em relação a probabilidade desse processo ocorrer, se dá de maneira similar ao caso da emissão espontânea. Para a emissão estimulada podemos escrever [6]:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -W_{21}N_2 \quad (2.1.4)$$

Onde:

$(dN_2/dt)_{st}$  Taxa de transições de 2 para 1 ocorridas como resultado da emissão estimulada;

$W_{21}$  Coeficiente de taxa de emissão estimulada.

Mais precisamente o coeficiente de taxa de emissão estimulada é dado por:

$$W_{21} = \sigma_{21} F \quad (2.1.5)$$

Onde:

$F$  Fluxo de fótons da onda;

$\sigma_{21}$  Seção de choque da emissão estimulada, dependendo das características de uma dada transição.

### 2.1.2.3 **Absorção**

Assumindo dessa vez que o átomo se encontra inicialmente no nível 1, e não no nível 2 como nos casos anteriores (Figura 2.3 c). Se este for o estado fundamental, o átomo permanecerá no mesmo nível a menos que uma força estimulante externa seja aplicada sob ele. Vamos assumir, então, que uma onda eletromagnética de frequência  $\nu=\nu_0$  está incidindo no material. Neste caso há uma probabilidade finita do átomo ser excitado ao nível 2. A diferença de energia requerida para o átomo sofrer esta transição é de  $E_2-E_1$  da energia da onda eletromagnética incidente<sup>[5]</sup>. A probabilidade do processo de absorção ocorrer será também similar aos demais comentados anteriormente. Pode-se definir a taxa de absorção  $W_{21}$  por meio da equação <sup>[6]</sup>:

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_a = -W_{12}N_1 \quad (2.1.6)$$

Onde:

$(dN_1/dt)_a$  Taxa de transições de 1 para 2 ocorridas devido a absorção;

$N_1$  População do nível 1.

E como a equação (2.1.5), podemos escrever:

$$W_{12} = \sigma_{12}F \quad (2.1.7)$$

Onde:

$F$  fluxo de fótons da onda;

$\sigma_{12}$  seção de choque da emissão estimulada, dependendo *apenas* das características da transição particular.

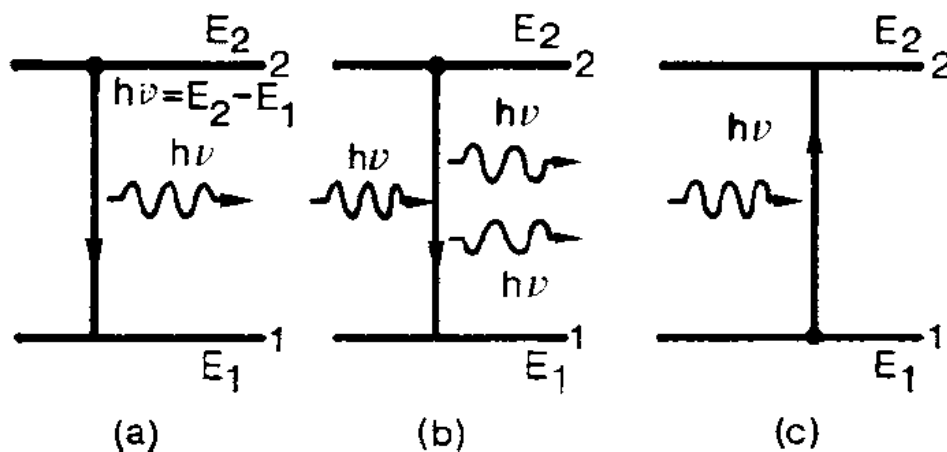


Figura 2.2 Ilustração esquemática dos três processos: (a) emissão espontânea, (b) emissão estimulada, um dos princípios que torna possível o funcionamento dos lasers e (c) absorção [6].

No início do século vinte, Einstein mostrou que dois níveis não degenerados, um sempre terá  $W_{21}=W_{12}$  e  $\sigma_{21} = \sigma_{12}$ . Se os níveis apresentam diferentes degenerações, terão:

$$g_1 W_{21} = g_2 W_{12} \quad (2.1.8)$$

$$g_2 \sigma_{21} = g_1 \sigma_{12} \quad (2.1.9)$$

Note, então que os processos fundamentais de emissão espontânea, emissão estimulada e absorção podem ser facilmente descritos em termos de absorção e emissão de fótons como visto na figura 2.2. (1) Na emissão espontânea, o átomo decai do nível 2 para o nível 1 emitindo um fóton. (2) Na emissão estimulada, o fóton incidente estimula a transição  $2 \rightarrow 1$  e então há no final dois fótons. (3) No processo de absorção, o fóton incidente é simplesmente absorvido e produz a transição  $1 \rightarrow 2$ . Então pode-se dizer que cada processo de emissão estimulada cria um fóton enquanto que cada processo de absorção aniquila um fóton [6].



## 2.2 ESTRUTURA DO LASER E FUNCIONAMENTO

Neste subcapítulo iremos abordar as estruturas gerais dos lasers e como eles funcionam na maioria dos casos. Mais adiante nos tipos de lasers será abordado cada tipo de laser de maneira mais particular, exemplificando e explicando de uma maneira mais específica cada um deles, porém ainda resumida.

Um laser geralmente requer três componentes para sua operação: (1) um meio ativo, (2) um esquema de bombeamento que produza a inversão de população, (3)

uma cavidade ressonante ou cavidade óptica <sup>[7]</sup>. Nas seguintes seções será abordado cada um desses três componentes de forma mais específica.

### 2.2.1 MEIO ATIVO

O meio ativo pode ser gasoso, sólido e líquido. É a parte do laser que contém os átomos ou moléculas, as quais contém os electrons, que serão excitados através de um meio externo chamado de fonte de bombeamento (que será tratado nas próximas seções deste trabalho).

Considere dois níveis de energia arbitrários 1 e 2 de um dado material e tome  $N_1$  e  $N_2$  como sendo suas respectivas populações. Se uma onda plana com fluxo de fótons  $F$  está viajando ao longo de  $z$  no material, um elemento infinitesimal de fluxo,  $dF$ , com um elemento infinitesimal de largura,  $dz$ , do material será devido tanto estimulado e processos de emissão ocorrendo na região sombreada da figura 2.3. Tome  $S$  como sendo a área da seção transversal do feixe. A variação no número de fótons incidentes e emergentes na região sombreada, em um dado tempo, será então  $SdF$ . Desde que cada processo estimulado crie enquanto cada processo de absorção aniquile um fóton,  $SdF$  deve ser igual a diferença dos eventos de emissão estimulada e absorção ocorridos na região sombreada por tempo. A partir de (2.1.4) e (2.1.6) podemos escrever  $SdF = (W_{21}N_2 - W_{12}N_1)(Sdz)$ , onde  $Sdz$  é o volume da região sombreada. Com ajuda das equações (2.1.5) e (2.1.7) e (2.1.9) obtemos <sup>[7]</sup>:

$$dF = \sigma_{21}F \left[ N_2 - \left( \frac{g_2 N_1}{g_1} \right) \right] dz \quad (2.2.1)$$

Note que a equação (2.2.1) não leva em conta os decaimentos radioativos e não-radioativos. Na realidade, o decaimento não-radioativo não adiciona novos fotos enquanto que o decaimento radioativo emite fótons e direções que não contribuem para o feixe de fótons  $F$ .

A equação (2.2.1) mostra que o material age como um amplificador (i.e.  $dF/dz > 0$ ) se  $N_2 > g_2 N_1 / g_1$ , enquanto que um absorvedor age se  $N_2 < g_2 N_1 / g_1$ .

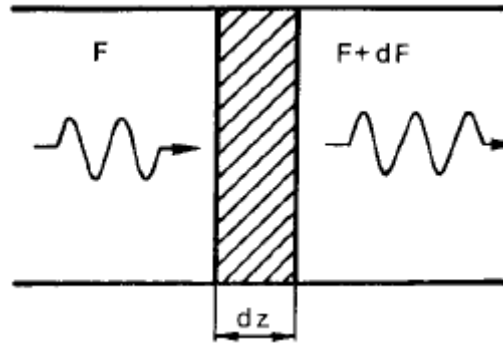


Figura 2.3 Elemento infinitesimal de fluxo,  $dF$  de uma onda e.m. plana viajando uma distancia infinitesimal,  $dz$  através do material [7].

Agora, falando sobre equilíbrio térmico, as populações são descritas por:

$$\frac{N_2^e}{N_1^e} = \frac{g_2}{g_1} \exp - \left[ \frac{E_1 - E_2}{kT} \right] \quad (2.2.2)$$

Onde:

k            Constante de Boltzmann;

T            Temperatura absoluta.

Em equilíbrio térmico temos que  $N_2^e < g_2 N_1^e / g_1$ . De acordo com a equação (2.2.1) o material age como um absorvedor, e é isso o que acontece em condições normais. Se, contudo, uma condição de não-equilíbrio é atingida,  $N_2 > g_2 N_1 / g_1$ , o material irá atuar como um amplificador. Neste caso haverá a *inversão de população* no material. A inversão de população é dita como o contrário do que existe em condições de equilíbrio e será abordada nas próximas ponto seções mais a fundo. O material no qual a inversão de população é produzida é chamado de *meio ativo* [7].



Se uma transição de frequência  $\nu_0 = (E_2 - E_1)/kT$  está na região de microndas, o amplificador chama-se *maser*. A palavra maser é um acrônimo para “*microwave amplification by stimulated emission of radiation*”. Se a frequência de transição está na região óptica, o amplificador é chamado de *laser*. A palavra laser vem do mesmo acrônimo, porém com a substituição da letra *m* (microwave) por *l* (light)<sup>[5]</sup>. Porém a mesma palavra é atualmente aplicada para qualquer aparelho que emite radiação, tanto longe quando próximo do infravermelho, ultravioleta ou até na região de raio-X. Para se especificar o tipo de radiação emitida, usa-se a denominação de laser de infravermelho, visível, ultravioleta ou de raio-X<sup>[7]</sup>.

### 2.2.2 BOMBEAMENTO E A INVERSÃO DE POPULAÇÃO

Uma vez tendo o apropriado meio ativo, é necessário que haja agora um modo de inserir energia para dentro do sistema com a finalidade de causar transições para estados de energia mais elevados, o que nessa seção será tratado como é feito isso.

Considere a situação onde a energia injetada ao sistema em equilíbrio térmico (sistema em que os átomos tendem a ficar no estado de menor energia) faz com que o número de átomos no estado excitado seja maior que o número de átomos no estado fundamental. Tal não-equilíbrio é, sem dúvida, necessário para quase todos os lasers e é chamado de *inversão de população*. Não é necessário excitar todos os átomos a um nível mais alto de energia. O requerimento é que haja uma população maior no estado excitado de uma particular transição do que no estado fundamental desta mesma transição<sup>[8]</sup>. Para que ocorra essas transições, precisa-se de um fornecimento de energia para o meio laser, de modo excitar átomos. Isso pode ser alcançado por inúmeros meios, incluindo térmicos, elétricos, ópticos, químicos, or nucleares.

A maioria dos lasers comuns usam meios elétricos ou ópticos. No caso de bombeamentos ópticos, a luz de lâmpadas flash são focadas sobre uma haste

contando os átomos do laser. Hastes comuns incluem ruby (íons crômio em um óxido de alumínio host glas) e YAG (íons de neodímio em um ítrio-alumínio-garneto host glass). Os átomos do laser (crômio ou neodímio neste caso) absorvem os fótons incidentes do bombeamento da luz e se excitam a níveis de energia mais elevados. Um bombeamento elétrico (como a maioria dos lasers a gás) usam descargas elétricas para excitar átomos a níveis mais altos de energia. Na maioria dos lasers (ex. HeNe), os átomos de lasers atuais são neon, o qual é bombeado através de um processo de dois passos envolvendo duas espécies atômicas. Neste caso, o hélio serve para bombear os átomos de neon quando os átomos de hélio que colidem com os átomos de neon, transferindo energia para os átomos de neon. Há outros inúmeros outros métodos de injetar energia para um laser incluindo reações químicas e nucleares, entre outros. Independentemente dos métodos empregados, o objetivo final é excitar os átomos de modo a alcançar a inversão de população [8].

Pode haver a pergunta, como o bombeamento pode assegurar que o nível mais alto energia seja preenchido sem preencher o nível de mais baixa energia? (Criando uma inversão de população). A resposta está no design da fonte bombeadora e no método de assegurar que o estado de mais alta energia seja bombeado seletivamente e o estado de mais baixa energia não. É evidente que o método de bombeamento deve assegurar que o nível mais alto de energia seja povoado enquanto que o nível mais baixo de energia relativamente vazio, para isso é razoavelmente que os mecanismos sejam muito bem avaliados. Um ponto fundamental a se avaliar neste caso são os *esquemas de bombeamentos*, tratados na seguinte seção [7].

#### 2.2.2.1 Esquemas de bombeamento (Pumping Schemes)

Precisa-se considerar agora o problema de como a inversão de população pode ser produzida em um determinado material. Em primeira vista, isso seria possível através da interação com o material de uma onda eletromagnética suficientemente

forte. Porém não é o que acontece na realidade. No equilíbrio térmico, o qual tem  $g_1 N_1 > g_2 N_2 g_1$ , a absorção irá predominar sobre a emissão estimulada. A onda incidente irá produzir mais transições  $1 \rightarrow 2$  do que  $2 \rightarrow 1$  no meio ativo e por fim esperaria-se que houvesse a inversão de população. Porém na prática, é visto que tal sistema é falho em cumprir tal tarefa. De fato tal situação será alcançada quando  $g_2 N_2 = g_1 N_1$ , onde os processos de emissão e absorção são compensados, de acordo com a equação (2.2.1). Essa situação geralmente é referida como *two-level saturation* (em português, *saturação dos dois níveis*). Então o problema é resolvido se utilizando de mais níveis de energia, o que será explicado nessa parte do capítulo [7].

### 2.2.2.2 **Laser de três níveis**

Em um sistema de três níveis (Figura 2.6(a)) os átomos são excitados ao nível mais superior de energia, de lá os átomos decaem para o nível de laser superior de energia ULL (Do inglês “*upper lasing level*”) através de uma transição rápida sem geração de fótons, apenas calor. O nível ULL geralmente apresenta um tempo de vida mais longo, conseqüentemente uma grande quantidade de átomos se acumulam neste nível. As transições laser ocorrerão entre o nível ULL e o nível fundamental, emitindo a luz laser neste processo [8].

O mais importante caso de lasers de três níveis de energia é o laser de Ruby, historicamente importante por ter sido o primeiro laser feito para operar, embora não foi amplamente utilizado. Porém há o laser de quatro níveis de energia, onde se consegue uma inversão de população mais facilmente do que no lasers de três níveis de energia [6].

### 2.2.2.3 Laser de quatro níveis

A característica no laser de quatro níveis é a nível discreto de energia laser superior, ULL, e inferior, LLL, (Do inglês “*lower lasing level*”). Os laser de quatro níveis de energia são de longe os mais comuns atualmente [8].

Em um sistema de quatro níveis de energia (Figura 2.6 (b)) os átomos são novamente bombeados do nível fundamental ao nível superior. O átomo decairá quase que instantaneamente para o ULL (novamente por um decaimento rápido não-radioativo), uma inversão de população será alcançada entre ULL e LLL. E finalmente decaindo para o nível fundamental [7].

Em um laser de quatro níveis, o ganho é realizado tão breve quanto a energia de bombeamento seja aplicada ao sistema. A energia bombeada para o nível superior, no qual há o decaimento, na maioria dos casos ocorre quase que instantaneamente, para o ULL. Assuming ainda que o ULL apresentar um tempo de vida mais longa do que o LLL (como em grande parte dos lasers de quatro níveis) a inversão de população é atingida quase que imediatamente, ocorrendo a inversão e logo o ganho [8].

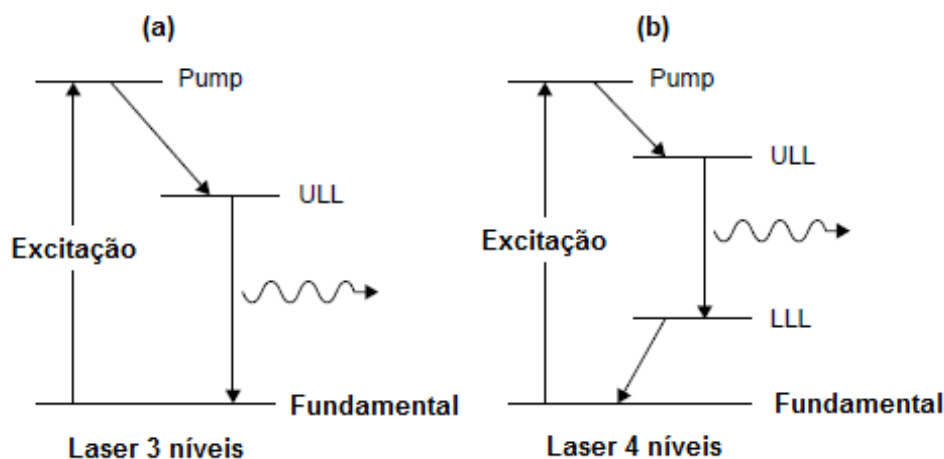


Figura 2.4 (a) Esquemas de sistemas lasers com três níveis e (b) com quatro níveis [8].

Após estas explicações, há a pergunta: por que o laser ruby funcionou muito bem como material laser, então? As razões são (1) uma ampla banda de bombeamento, a qual rapidamente absorve a energia da lâmpada flash, (2) as bandas de bombeamento tem tempos de vida extremamente pequenos (da ordem de  $1\mu\text{s}$ ), o que tem como efeito o imediato o bombeamento dos átomos para o nível superior de energia e finalmente (3) o tempo de vida no nível superior de energia é de  $3\text{ms}$ , o que é bastante longo, permitindo que íons excitados pudessem ter boas chances de emitir luz por emissão estimulada. <sup>[8]</sup>

### 2.2.3 CAVIDADE RESSONANTE OU ÓPTICA E GANHO

Após alcançar a inversão de população, a energia deve ser armazenada em uma cavidade e amplificada. Do ponto de vista prático, isto é obtido por meio de uma cavidade ressonante, que nada mais é que o interferômetro de Fabry-Pérot <sup>[12]</sup>.

A amplificação é dada através de uma cavidade simples consistindo de dois espelhos esféricos, que satisfaçam as condições de contorno impostas pelos raios de curvatura dos espelhos para feixes Gaussianos. Para que se atinja uma cavidade estável (com ganhos consideráveis) precisa-se ter uma geometria tal que os raios de curvatura dos espelhos coincidam com os da frente de onda. Nessa situação o feixe volta sobre si mesmo e refaz o caminho anterior sem sofrer modificações em seu perfil transversal, resultando em uma cavidade estável <sup>[12]</sup>.

Para fazer um amplificador a partir de um oscilador, é necessário introduzir um feedback positivo adequado, que é um dos desafios na construção de uma cavidade ressonante. Na região de micro-ondas isso é feito colocando o meio ativo em uma cavidade tendo ressonância na frequência  $\nu_0$ . No caso do laser com frequências no comprimento de onda visível, isso geralmente é alcançado com colocando-se dois

espelhos altamente reflexivos paralelos. Nesse caso, a onda eletromagnética plana irá viajar em direção perpendicular aos espelhos e será refletida para frente e para trás entre os dois espelhos, sendo amplificada em cada passagem pelo meio ativo. Se um dos espelhos é feito parcialmente reflexivo, o feixe emergente será obtido através deste espelho (Figura 2.4). Para ambas as gamas de frequências, é necessário que uma condição limiar seja alcançada. No caso dos laser no comprimento de onda visível, por exemplo, a oscilação começará quando o ganho do meio ativo compensar as perdas no laser (os tipos de perdas serão abordados mais adiante neste capítulo). Esse limiar é alcançado quando a inversão de população chega a um ponto crítico, conhecido como *inversão crítica*,  $N_c$ , dada por<sup>[12]</sup>:

$$N_c = - \frac{[\ln R_1 R_2 + 2 \ln(1 - L_i)]}{2\sigma l} \quad (2.2.3)$$

Sendo:

$R_1$  e  $R_2$  Poder de reflexividade dos espelhos 1 e 2 respectivamente;

$\sigma = \sigma_{21}$  Seção de choque do feixe;

$L_i$  Perdas internas por cada passada no meio ativo;

$l$  Comprimento do meio ativo.

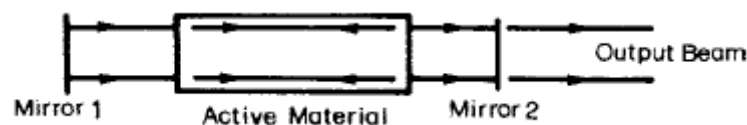


Figura 2.5 Esquema da cavidade ressonante de um laser <sup>[7]</sup>.

A expressão (2.2.3) pode ser simplificada definindo expressões que representam perdas internas logarítmicas dos espelhos da cavidade. As seguintes expressões podem ser chamadas de *perdas na cavidade por passada*,  $\gamma_i$  [7]:

$$\gamma_1 = -\ln R_1 = -\ln(1 - T_1) \quad (2.2.4a)$$

$$\gamma_2 = -\ln R_2 = -\ln(1 - T_2) \quad (2.2.4b)$$

$$\gamma_i = -\ln(1 - L_i) \quad (2.2.4c)$$

Onde:

$T_1$  e  $T_2$  Transmissões dos espelhos 1 e 2 respectivamente;

Fazendo as seguintes substituições das equações (2.2.4) na equação (2.2.3), obtem-se:

$$N_c = \frac{\gamma}{\sigma l} \quad (2.2.5)$$

Onde para se chegar a equação (2.2.5) foi definido que:

$$\gamma = \gamma_i + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (2.2.6)$$

Note que, quando  $L_i \ll 1$  como normalmente ocorre, tem-se  $\gamma_i \cong L_i$

Uma vez a *inversão crítica* alcançada, a oscilação começa a acumular emissões espontâneas. Os fótons que são espontaneamente emitidos ao longo do eixo z, irão de fato iniciar o processo de amplificação. Esta é a base do laser oscilador, ou laser, mais comumente chamado [7].

### 2.2.3.1 Cavidades ópticas: Casos especiais importantes

Um dos pontos principais a alcançar uma cavidade óptica está na condição de confinamento (estabilidade). Ao dar uma volta completa na cavidade, é esperado que tanto o raio de curvatura como o semi-diâmetro do feixe se reproduzam. A partir desta condição, pode-se chegar a equação válida para cavidades esféricas simétricas:

$$0 \leq \left(1 - \frac{l}{R_1}\right) \left(1 - \frac{l}{R_2}\right) \leq 1 \quad (2.2.7)$$

A figura 2.5 mostra graficamente o comportamento da desigualdade 2.2.7. Dela pode-se ver que as cavidade plano-paralelas e concêntricas são instáveis, enquanto que a confocal é estável [9]

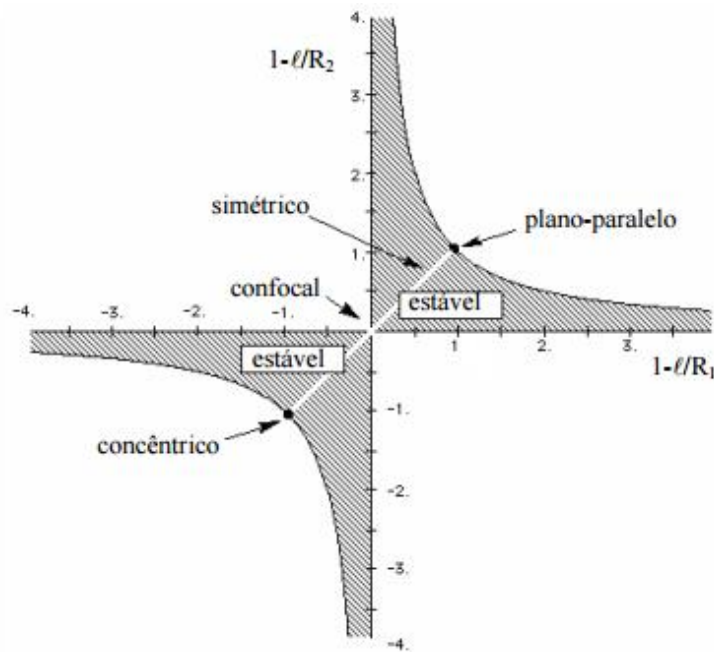


Figura 2.6 Diagrama de confinamento de cavidade ressonantes. A área branca (altas perdas) são áreas onde a condição de confinamento é violada. Já a área riscada (baixas perdas) são aquelas onde a condição é satisfeita.

[9]



Três casos especiais  $l/R = 0, 1$  e  $2$  merecem especial atenção por corresponderem exatamente aos planos paralelos, confocais e concêntricos [9].

◆ Plano paralelo  $l/R = 0$

Os dois espelhos estão paralelos um ao outro, sem conter nenhuma curvatura. Este é um caso onde há extrema instabilidade.

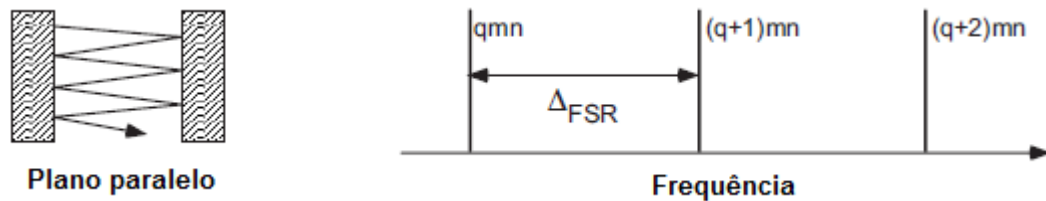


Figura 2.7 Exemplo da geometria em uma cavidade com espelhos plano paralelos

◆ Confocal  $l/R = 1$

Se caso a distância e a curvatura dos espelhos forem tais que os comprimentos de dos espelhos da cavidade coincidirem ( $f_1 + f_2 = R_1/2 + R_2/2 = l$ ) a configuração de uma cavidade confocal é obtida.

No caso simétrico tem-se  $R_1 = R_2 = l$ .

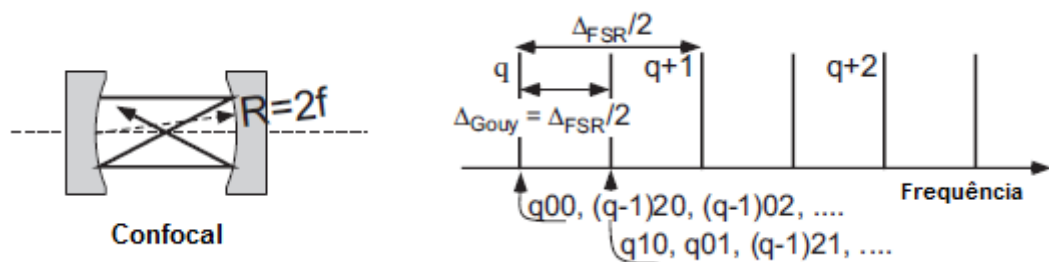


Figura 2.8 Exemplo da geometria em uma cavidade com espelhos confocais

◆ Concêntrico  $l/R = 2$

A cavidade, nesse caso depende fortemente da exata posição do espelho, o que conduz a um foco bem afiado, alcançando o limite de difração

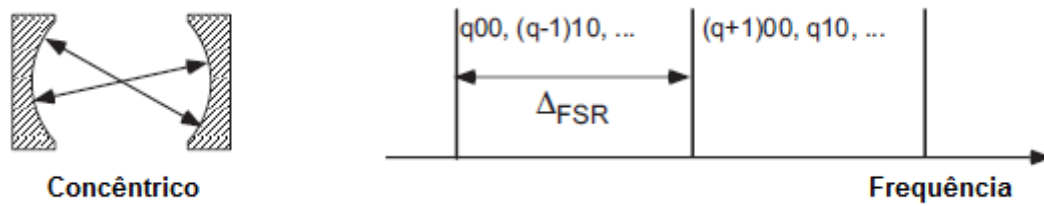


Figura 2.9 Exemplo da geometria em uma cavidade com espelhos concêntricos

### 2.2.3.2 Perdas em cavidades ópticas

Uma cavidade óptica é um dispositivo que permite o confinamento e aumento da radiação eletromagnética para que seja possível a emissão estimulada. Entretanto, existe alguns fatores que impedem que a energia seja amplificada indefinidamente. Os mecanismos de perda mais comum em cavidades óticas são basicamente três <sup>[12]</sup>:

- ◆ Reflexões imperfeitas: A perda por reflexão é inevitável já que sem a transmissão não há potências de saída. Além do mais, nenhum espelho é ideal, mesmo que sejam feitos para ter a maior reflexividade possível. Sempre existirá alguma absorção ou espelhamento que diminuirá a reflexividade para poucos menos dos 100%.
- ◆ Absorção e espalhamento no meio ativo: As transições de algum dos níveis atômicos populados durante o processo de bombeamento para níveis excitados mais altos constituem um mecanismo de perda que ocorre no meio ativo. O espalhamento causado por impurezas e imperfeições é bastante acentuado em meios ativos do tipo estado sólido.

- ◆ Perdas por difração: Para modos que se afastam consideravelmente do eixo óptico, a dimensão finita dos refletores faz com que alguma energia não seja interceptada por eles sendo, portanto, perdida. Para um dado conjunto de espelhos, esta perda será maior para os modos transversais de ordens mais altas porque neste caso a energia está mais concentrada fora do eixo óptico. Esse fato é utilizado para evitar a oscilação de modos de ordens altas. Introduzindo-se uma abertura dentro da cavidade óptica, cujo diâmetro é suficiente para permitir a passagem da maior parte do modo fundamental, aumenta as perdas dos modos de ordens mais altas.



## 2.3 PROPRIEDADES DO FEIXE DE LASER

Laser, como qualquer outra fonte de luz, é governada pelas mesmas regras e princípios, porém laser é diferente de outras fontes encontradas na natureza. Ele tem três propriedades especiais que conduzem à sua grande utilidade em muitas aplicações: coerência, monocromaticidade e direcionalidade (colimação), como mostrado na figura 2.4, abaixo. <sup>[8]</sup>

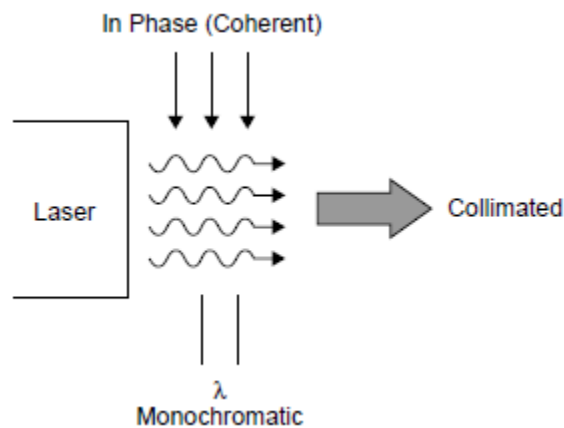


Figura 2.10 Propriedades da luz laser. [MARK CSELE, PG 96]

A radiação laser é caracterizada por seu extremo alto grau de (1) monocromaticidade, (2) coerência, (3) direcionalidade e (4) brilho. Para essas propriedades uma quinta pode ser adicionada, (5) pequeno tempo de duração. [5] pag 9. A seguir será abordado cada característica mais a fundo<sup>[8]</sup>.

### 2.3.1 MONOCROMATICIDADE

Essa propriedade é uma consequência das duas seguintes circunstâncias: (1) Apenas uma onda eletromagnética de frequência  $\nu$  dada pela equação 2.2 pode ser amplificada. (2) Já que o arranjo dos espelhos forma uma cavidade ressonante, onde oscilações podem ocorrer apenas em frequências ressonantes na cavidade. A última circunstância faz com que o laser tenha uma largura de linha muito mais estreita do que a linha usual da transição  $2 \rightarrow 1$  da emissão espontânea <sup>[7]</sup>.

### 2.3.2 COERÊNCIA

Podemos, para qualquer onda eletromagnética, introduzir dois conceitos de coerência, chamados de espacial e temporal.

Para definir coerência espacial, consideramos dois pontos  $P_1$  e  $P_2$  no tempo  $t=0$ , sob a mesma frente de onda eletromagnética e  $E_1(t)$  e  $E_2(t)$  são os correspondentes campos elétricos nesses pontos. Por definição, a diferença entre as fases dos dois campos no ponto  $t=0$  é zero. Agora, se essa diferença permanecer zero no ponto  $t>0$ , nós dizemos que há perfeita coerência entre estes dois pontos. Se isso ocorre para qualquer dois pontos da frente de onda, nós dizemos que a onda tem *perfeita coerência espacial* [8].

Para definir coerência temporal, nós consideramos o campo elétrico da onda eletromagnética no ponto  $P$ , no tempo  $t$  e  $t + \alpha$ . Se, para um determinado atraso de  $\alpha$ , a diferença de fase entre os dois campos permaneça a mesma para qualquer tempo  $t$ , nós dizemos que há coerência espacial sobre o tempo  $\alpha$ . Se isso ocorre para qualquer valor de  $\alpha$ , a onda eletromagnética terá *perfeita coerência temporal* [8].

### 2.3.3 DIRECIONALIDADE

Essa propriedade é consequência do fato que o meio ativo é posto em uma cavidade ressonante. Neste caso o plano paralelo da Figura 111, por exemplo, apenas uma onda é propagada na direção ortogonal dos espelhos (ou na direção muito próxima) pode ser sustentada na cavidade. Para um entendimento melhor sobre as propriedades direcionais do feixe de laser (ou, em geral, de qualquer exemplo de onda eletromagnética), é conveniente considerar, separadamente, o caso de um feixe com perfeita coerência espacial e o caso de coerência espacial parcial [7].

Vamos considerar o caso de uma perfeita coerência espacial, até mesmo para esse caso o laser tem uma abertura finita por causa da divergência inevitável devido a difração. Um feixe monocromático de intensidade uniforme é incidido em uma superfície com uma fenda de tamanho  $D$ . De acordo com o princípio de Huyghens, a frente de onda no plano  $P$  atrás da superfície pode ser obtida de uma superposição de ondas elementárias emitidas por cada ponto da fenda. Por causa do tamanho finito da fenda  $D$ , o valor de divergência da fenda é finito também e pode ser obtido pela teoria da difração. Para uma arbitrária amplitude, obtemos uma distribuição [7].

$$\theta_d = \frac{\beta \lambda}{D} \quad (2.1)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $D$  é o tamanho do feixe. O fator  $\beta$  é um coeficiente numérico de ordem de unidade que os valores dependem da forma que a fatores como distribuição de amplitude e divergência são definidas. Esse tipo de feixe tem *difração limitada* [7].

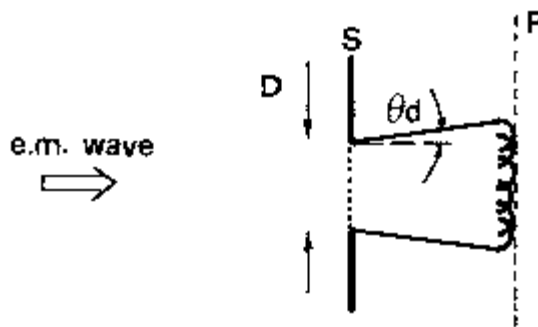


Figura 2.11 Divergência de uma onda eletromagnética plana devido a difração

Se a onda tem uma coerência parcial espacial, a sua divergência será muito maior que o valor mínimo definido pela difração. Conclui-se que dados condições operacionais adequadas, a difração do feixe de laser pode ser limitada [8].

#### 2.3.4 BRILHO

Definimos brilho de uma dada fonte de onda eletromagnética como a potência emitida por unidade de superfície de área por ângulo sólido. Para ser mais preciso, tome  $dS$  como sendo elemento de superfície de área no ponto  $O$  da fonte. A potência  $dP$  emitida por  $dS$  no ângulo sólido  $d\Omega$  na direção  $OO'$  pode ser escrita como <sup>[7]</sup>:

$$dP = B \cos \theta \, dS d\Omega \quad (2.2)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo entre  $OO'$  e a normal  $\mathbf{n}$  da superfície. Note que o fator  $\cos \theta$  aumenta simplesmente do fato que a quantidade fisicamente importante para a emissão ao longo da direção  $OO'$  é a projeção de  $dS$  no plano ortogonal da direção  $OO'$ . Por exemplo,  $\cos \theta dS$ . A quantidade  $B$  é chamada brilho da fonte no ponto  $O$  na direção  $OO'$ . Esta quantidade irá geralmente depender das coordenadas polares  $\theta$  e  $\Phi$  da direção  $OO'$  e no ponto  $O$ . Quando  $B$  é constante, a fonte é dita ser isotrópica <sup>[7]</sup>.

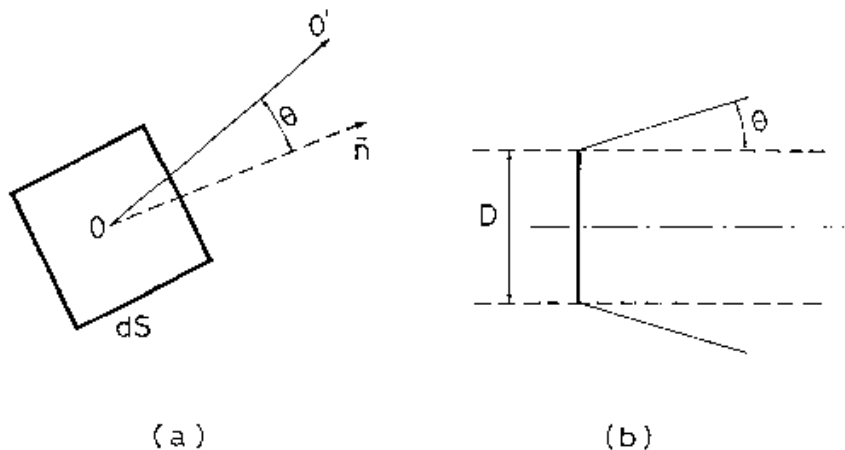


Figura 2.12 (a) Brilho no ponto  $O$  para uma **fonte geral de ondas eletromagnéticas**. (b) Brilho de um **feixe de laser** de diâmetro  $D$  e divergência  $\theta$

Brilho é o parâmetro mais importante para o feixe laser e, em geral, qualquer fonte de luz. Um feixe de laser de até mesmo intensidade moderada (por exemplo alguns miliwatts) tem um brilho de muitas ordens de magnitude maior que o brilho de

fontes convencionais. Isto é principalmente devido as altas propriedades direcionais do feixe laser <sup>[8]</sup>.

Vale abordar um exemplo sobre a relação entre luminosidade e potência, as quais não estão diretamente associadas quando comparadas em diferentes comprimentos de onda. Por exemplo utilizando um determinado laser com potências necessária para a mesma percepção de luminosidade, foi feito a tabela 6.2, na qual se usou um laser classe 1 com 0,24 mW e 532nm de base. Percebe-se que para uma mesma luminosidade de feixe, nota-se um aumento de potência em faixa de comprimentos de onda maiores, chegando a potências de até 6,8mW. Isso se deve a uma maior absorção da cor verde pelos olhos humanos <sup>[10]</sup>.

Cor do Feixe de Laser	Comprimento de onda (nm)	Potência do Laser (mW)	Classe de Laser
Verde	532	0,24	1
Laranja	635	1	2
Vermelho	655	2,66	3R
Vermelho Escuro	670	6,8	3B

Tabela 2.1 Potências de lasers para mesma percepção de luminosidade <sup>[10]</sup>.

### 2.3.5 CURTO TEMPO DE DURAÇÃO

É possível produzir pulsos de luz com durações de aproximadamente o inverso da largura de linha da transição 2→1. No entanto, lasers a gás, os quais tem uma largura de linha relativamente estreita, a largura de pulso pode ser de aproximadamente 0,1-1 ns. Tais pulsos não são tão especiais, até mesmo lâmpadas de flash podem emitir pulsos com essa duração. De outro lado, a largura de linha de alguns lasers de estado sólido e líquido pode ser de  $10^3$  -  $10^5$  vezes mais largo que os laser a gás, e nesse caso, os pulsos podem ser gerados com tempos mais curtos



(abaixo de aproximadamente 10 fs). Isto abre novas possibilidades muito interessantes no campo de pesquisa e aplicabilidade de lasers [7].

Note, que a propriedade de pequeno tempo de duração, a qual implica em uma concentração de energia no tempo, em certo sentido, pode ser considerada uma característica com efeitos homólogos aos da monocromaticidade. Pois a monocromaticidade implica, também, em uma concentração de energia porém em um comprimento de onda. De fato, todos os lasers podem, em princípio, ser feitos extremamente monocromáticos, porém apenas lasers com ampla largura de linha, por exemplo de estado sólido e lasers líquido, podem produzir pulsos de duração muito curta [7].



## 2.4 TIPOS DE LASERS

O primeiro laser foi feito com Rubi por Maiman, em 1960. Desde então, um grande número de materiais em diversos meios ativos tem dado aos lasers emissões nas regiões visíveis, ultravioletas e infravermelhas do espectro eletromagnético. Isso inclui vários gases, sólidos, líquidos, plásticos, semicondutores, corantes... Além do cristal Rubi, muitos outros cristais dopados (introduzidos uma impureza) com íons raros têm se mostrado extremamente úteis em forma de um feixe de laser [7].

Os vários tipos de lasers até hoje desenvolvidos, mostram uma ampla gama de parâmetros físicos e de operação. Se os lasers forem classificados de acordo com o estado físico do meio ativo, usa-se a descrição *laser de estado sólido*, *líquido* e *laser a gás*. Se os lasers são classificados de acordo com o comprimento de onda emitido, podem ser classificados como lasers infravermelhos, luz visível, ultravioleta ou laser de raio-x. As potências de saída vão de poucos mW, em lasers de fontes de sinais (por exemplo comunicações ópticas e scanners de código de barra), a centenas de kW,

em lasers usados para trabalhar com materiais,  $\approx 5\text{MW}$ . Lasers pulsados podem atingir picos de energia muito maiores que lasers contínuos, alguns podendo atingir até  $1\text{PW}$  ( $10^{15}\text{W}$ ). Em relação aos lasers pulsados, a duração do pulso varia de ms a  $10\text{fs}$  ( $10^{-15}\text{s}$ ) dependendo do regime de operação de cada um. As dimensões da cavidade podem variar também. Em termos da cavidade, por exemplo, podem ter uma largura tão pequena quanto  $\approx 1\mu\text{m}$  até lasers de alguns quilômetros (por exemplo um laser de  $6,5\text{km}$ , o qual foi construído em uma cavidade para estudos de geodésia) [7]. Nos próximos pontos serão abordados primeiramente tipos de lasers que envolvem um meio ativo de alta densidade (Laser de estado sólido, corante e semiconductor). Estes são amplamente usados e suas características representam a grande maioria dos lasers.

#### 2.4.1 *LASER DE ESTADO SÓLIDO*

Atualmente o laser ruby é abordado por razões históricas, nessa seção, será sempre tratado o caso do laser ruby e logo em seguida o caso para os laser de neodímio porque ele são a maioria das lasers de estados sólido [7].

Os semicondutores porém não estão incluídos nessa categoria pois os mecanismos de bombeamento e de ação do laser são bem diferentes desta categoria. Por isso, comentados em uma seção separada [7].

##### 2.4.1.1 **Meio ativo**

O ruby é sinteticamente óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dopado com íons  $\text{Cr}^{3+}$  em uma concentração de  $0,05\%$ . O laser ruby é um sistema de três níveis e como tal, exige limiares altos de bombeamento. A dinâmica do ruby como laser é ruim, porém devido a sua larga banda de absorção e o seu tempo de vida relativamente longo no nível

laser mais energético, permite o ruby operar em modo pulsado, assim alcançando apenas a inversão temporariamente. É compreensível, entretanto, a grande maioria dos lasers ruby são sempre pulsados, apenas uma minoriade lasers de pesquisa foram desenvolvidos para operar em modo contínuo (o qual exige uma refrigeração extrema) [8].

Já o meio ativo dos lasers de neodímio são compostos por  $\text{Nd}^{3+}$  incorporados a um cristal anfitrião de uma maneira quase idêntica ao meio ativo do laser Ruby. O cristal anfitrião mais comum é o YAG (Do inglês “yttrium-aluminum-garnet”). O comprimento de onda do feixe resultante depende do material anfitrião em si, pois ele quem modifica os níveis dos íons de neodímio incorporados. Na tabela 2.2 pode-se ver alguns outros materiais anfitriões utilizados seus comprimentos de onda resultantes. YAG é o material mais comum, especialmente para lasers de média-alta potência, enquanto que o vanádio é favorito para laser de baixas potências (<1W). O Nd:YAG é um sistema de quatro níveis, os múltiplos níveis de bombeamentos permitem a absorção da luz em uma ampla variedade de comprimentos de onda no vermelho e na região do vermelho próximo do espectro[8].

Nome comum	Fórmula Química	Comprimento de onda
YAG	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	1064
Vanádio	$\text{YVO}_4$	1064
Vidro	Vários vidros fosfatados e silicatos	1060/1054
YLF	YLF	1053
LSB	$\text{LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$	1062

Tabela 2.2Tabela de cristais anfitriões e seus resultantes comprimentos de onda para laser de estado sólido[8].

#### 2.4.1.2 Técnicas de bombeamento

Bombeamento óptico é o melhor e mais eficiente método de bombeamento para meio ativos de estado sólido, devido a suas largas bandas de absorção. Uma

significante fração da energia óptica pode ser facilmente usada para bombear os electrons do estado fundamental usando tanto fontes pulsadas como contínuas. O excesso de energia eleva a temperatura do material laser, por isso fontes de luz pulsadas são mais adequadas pela dissipação de calor <sup>[11]</sup>.

O laser ruby, como primeiro laser, teve sua estrutura de bombeamento relativamente simples, lâmpadas flash em formato helicoidal com o meio ativo centralizado no meio da helocóide. Por muitas razões, a tecnologia não mudou tanto, nos últimos ano apenas materiais mais eficientes com menores limiares de bombeamentos têm sido usados e mais compactos laser tem sido desenvolvidos para bombearem lasers semicondutores ao invés de lâmpadas <sup>[8]</sup>.

A potência específica dada para o Sistema depende da fonte de bombeamento. As fontes não são muito diferentes do caso do laser ruby, porém a diferença está que nas energias envolvidas. O laser de quatro níveis YAG apresenta características com limiares de energias de bombeamentos muito menos do que a do laser ruby, consequentemente as lâmpadas tendem a ser menores, com 250 J de potência dada normalmente (ao invés dos 1000 J para o laser ruby) <sup>[8]</sup>.

#### 2.4.2 *LASER DIODO SEMICONDUTOR*

Os laser semicondutores são os menores, mais baratos e podem ser produzido em massa <sup>[11]</sup>. Nenhum laser tem ganho tão amplas aplicações quanto ao laser (diodo) semicondutor. Encontrado desde aplicações de ponteiros de laser até DVD players. <sup>[8]</sup>. They are basically p-n junction diode, which produces light of certain wavelength by recombination of charge carrier when forward biased, very similar to the light-emitting diodes (LEDs). LEDs possess spontaneous emission, while laser diodes emit radiation by stimulated emission <sup>[11]</sup>.

Dentre os lasers mostrados até agora, junto com o laser semicondutor, eles compartilham algumas características em comum entre eles. A primeira característica é que apresentam amplas e fortes bandas de absorção, o que propicia o bombeamento por instrumentos ópticos. O que é de fato usado por lasers de estado sólido, laser de corante e algumas vezes laser semicondutores. E os altos valores de coeficientes de absorção permitem ter lasers com dimensões abaixo de micros (microlasers)<sup>[11]</sup>.

#### **2.4.2.1 Meio ativo**

O meio ativo em um semicondutor é no formato da região de junção de duas camadas dimensionais. Sem precisar de espelho externo para ter um feedback e assim sustentar as oscilações. A reflexividade devido aos diferentes índices refrativos das duas camadas e as reflexões internas totais no meio ativo são suficientes para atingir esse propósito. As superfícies das extremidades são clivadas e o paralelismo das superfícies refletoras, então, é assegurado (Figura 2.14) <sup>[11]</sup>.

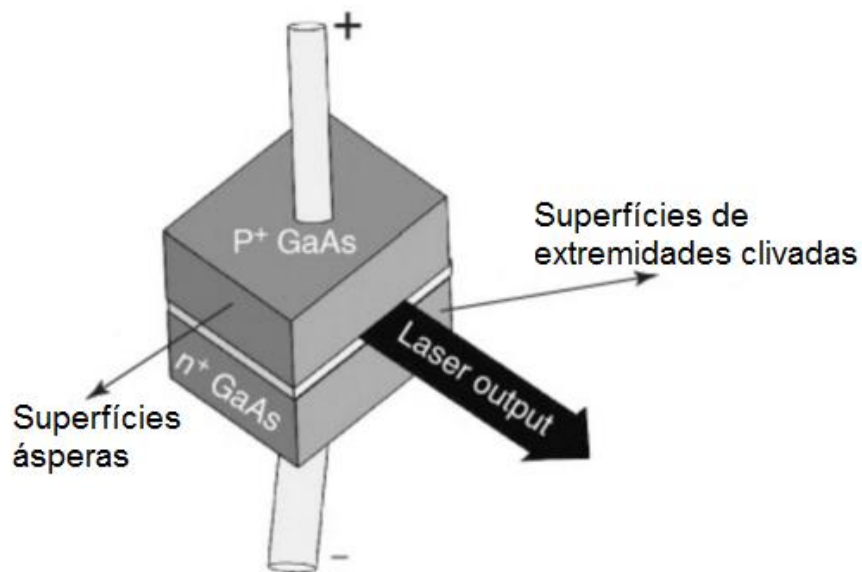


Figura 2.13 Ilustração da arquitetura de um laser semiconductor <sup>[11]</sup>.

Há dois tipos de junções p-n, as homojunções e heterojunções. A homojunção tem apenas importância histórica, já que perdeu sua utilidade com a heteroestrutura dupla (DH) onde o meio ativo é um “sandwich” entre p e n materiais que correspondem a diferentes meios ativos. A homojunção podia operar apenas lasers contínuos em temperaturas de 77K, enquanto que com a invenção da heterojunção, se tornou possível lasers contínuos a temperaturas ambientes. Esse possibilitou a aplicação de lasers em diversas áreas <sup>[11]</sup>.

#### 2.4.2.2 Técnicas de bombeamento

O laser diodo vem dominando o campo laser em sua importância tecnológica e se tornou um elemento chave e em número vasto de aplicações, mais notavelmente em comunicações por fibra óptica e armazenamento de dados. Seu sucesso é devido a sua técnica de bombeamento, os lasers semicondutores são simplesmente

bombeados pela passagem de uma corrente através deles com certa voltagem que seja compatível com o seu circuito integrado <sup>[12]</sup>.

Quando operado em baixas correntes, a inversão de população criada serve para compensar as perdas para o sistema apenas, conseqüentemente, nenhuma ação laser é alcançada. Aumentando a corrente acima de um valor crítico, chamado de limiar de corrente, a ação laser se inicia. Lasers semicondutores tem uma grande divergência comparado com os outros sistemas, o qual é devido a pequena seção transversal da região ativa <sup>[12]</sup>.

#### **2.4.2.3 Operação**

Os princípios gerais de amplificação e oscilação em lasers semicondutores são os mesmos que em lasers de estado sólido e laser a gás. O funcionamento do laser semicondutor pode ser explicado com a ajuda da figura 2.7. Onde a banda de valência do condutor V e a banda de condução C são separadas por um gap de energia  $E_g$ . De acordo com a figura (a) a banda de valência estará completamente cheia de elétrons enquanto a banda de condução completamente vazia. Então, através do mecanismo de bombeamento adequado, alguns elétrons são levados dos níveis de valência ao nível de condução<sup>[12]</sup>.

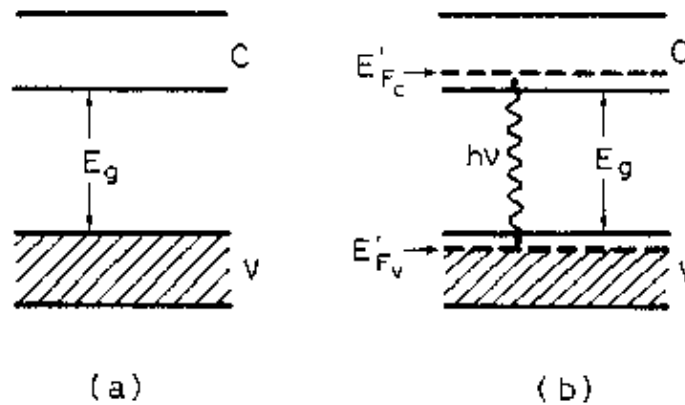


Figura 2.14 Princípios de funcionamento de lasers semicondutores [7].

Após um tempo muito curto ( $\approx 1$  ps), os elétrons na banda de condução caem para os níveis desocupados mais baixos desta banda. Enquanto isso, qualquer elétron próximo do topo da banda de valência também cai para o nível desocupado mais baixo desta mesma banda, consequentemente deixando buracos no topo desta banda (Figura 2.15(b)). Essa situação pode ser explicada introduzindo os níveis de quasi-Fermi para a banda de condução, ( $E'_{F_C}$ ), e para a banda de valência, ( $E'_{F_V}$ ) [7].

A emissão de luz, agora ocorre quando um elétron, da banda de condução, cai de volta para a banda de valência recombinaando com um “buraco”. Este processo é também chamado de processo de radiação recombinante, o mesmo processo que a radiação é emitida em LED (Do inglês “*light emitting diodes*”). Dando então as apropriadas condições, o processo de emissão estimulada irá ocorrer, conduzindo a ação laser. A condição para que o fóton seja amplificado, ao invés de absorvido pelo semicondutor é simplesmente dado por[7]:

$$E_g \leq h\nu \leq E'_{F_C} - E'_{F_V} \quad (2.4.1)$$



Então, em um caso simples de  $T=0K$ , para atingir a condição da Eq (2.4.1), precisa-se, claramente que  $E'_{Fc} - E'_{Fv} \geq E_g$ . É importante neste ponto realizar que os valores  $E'_{Fv}$  e  $E'_{Fc}$  dependem da intensidade do processo de bombeamento, ou seja, densidade de elétrons  $N$  que são elevados à banda de condução. Então, para que o ganho exceda as perdas por absorção, a densidade de elétrons  $N$  deve exceder um valor crítico estabelecido por [7].:

$$E'_{Fc} - E'_{Fv} = E_g \quad (2.4.2)$$

Portanto, caso a densidade injetada de elétrons no nível superior seja maior que essa limiar, o aparelho apresentará um ganho líquido. Se, esse meio ativo for posto em uma cavidade e a ação laser superar as perdas para a cavidade, então será gerado um feixe laser [7].



## 2.5 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

Este subcapítulo foi baseado unicamente no conteúdo do curso “Laserschutzbeauftragten”. Nesta parte será abordada algumas definições física-matemáticas básicas dos lasers. Estas definições ajudarão a entender alguns cálculos feitos mais adiante no trabalho.

### 2.5.1 *RELAÇÃO DE CONVERSÃO DE MEDIDAS DE ÂNGULOS*

Quando medimos o ângulo de algum arco, comumente utilizamos duas unidades, o grau e o radiano. Temos que uma circunferência possui 360 arcos de

abertura igual a  $1^\circ$  (um grau). Caso a medida seja feita em radianos, 1 radianos (1 rad) vale quando o comprimento da circunferência se iguala ao comprimento do raio desta circunferência. Grau e radiano são diferentes unidades de medidas de ângulo que podem ser relacionadas por meio de um círculo unitário. Relacionados por <sup>[10]</sup>:

$$1^\circ = 0,0175 \text{ rad} \quad (2.5.1)$$

$$360^\circ = 2\pi \text{ (rad)} \quad (2.5.2)$$

Já a área circular de um objeto circular (neste trabalho, do feixe laser) é dado por:

$$A = \pi \times r^2 \quad (2.5.3)$$

Sendo:

$r$               Radio da área circular em questão.

## 2.5.2 ENERGIAS E POTÊNCIAS LASERS

Energia e potência são parâmetro muito importantes para um laser, estão estritamente ligados com a segurança que deve ser dada ao laser quando em operação <sup>[10]</sup>.

### 2.5.2.1 Energia

E energia,  $Q$ , para um laser *laser contínuo* e *pulsado* é dada por <sup>[10]</sup>:

$$Q = P * t \quad (2.5.4)$$

E a densidade de energia,  $H$ :

$$H = \frac{Q}{A} \quad (2.5.5)$$

Sendo

P Potência de um feixe dada em W;

t Tempo em s.

### 2.5.2.2 Potência

Potência é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo para um determinado meio, neste trabalho será considerado esse meio como sendo o feixe de laser. Isto é, para um *laser contínuo* <sup>[10]</sup>:

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.5.6)$$

Em um *laser pulsado* há a potência de pico, a máxima, e a potência média. A potência de pico,  $P_p$ , é expressa por <sup>[10]</sup>:

$$P_p = \frac{Q}{T} \quad (2.5.7)$$

Sendo  $T$  é a duração de pulso dada em segundos. Enquanto que a potência média,  $P_o$  <sup>[10]</sup>:

$$P_o = Q \times f \quad (2.5.8)$$

Sendo  $f$  a frequência, dada em Herz (Hz). Em lasers pulsados a quantidade de pulsos em um intervalo de tempo, sua frequência, é uma característica não presente nos lasers contínuos obviamente, e é dada por <sup>[10]</sup>:

$$f = \frac{\text{número de impulsos } N}{\text{Tempo } t} \quad (2.5.9)$$

Já a densidade de potência (ou irradiância) para o *laser contínuo* e *laser pulsado* é dada por <sup>[10]</sup>:

$$E = \frac{H}{t} \quad (2.5.10)$$

Substituindo H pela equação (2.5.5), chega-se a equação para *laser contínuo* <sup>[10]</sup>:

$$E = \frac{P}{A} \quad (2.5.11)$$

E para *laser pulsado* <sup>[10]</sup>:

$$E = \frac{P_p}{A} \quad (2.5.12)$$

### 2.5.3 PARÂMETROS DE RADIAÇÃO GEOMÉTRICA

O parâmetros de radiação geométrica são importantes para determinar a divergência de um feixe de laser. Para esse cálculos há a necessidade de se encontrar primeiramente o diâmetro do feixe em um ponto. Para isso, normalmente, usa-se o diâmetro do feixe  $d_{63}$ , que é o diâmetro do feixe que abrange 63% do total do desempenho do feixe (ou energia). Nesse caso a irradiância cai em 1/e (37%) do valor máximo. Para calcularmos o diâmetro do feixe no foco de uma lente, usamos <sup>[10]</sup>:

$$d_{63} = \frac{\lambda \times f}{\pi \times d_{63}} \quad (2.5.13)$$

Sendo que  $d_{63}$  é diâmetro do feixe;  $f$  a distância focal da lente e  $\lambda$  o comprimento de onda emitido pelo laser. Seguindo cálculo, podemos calcular então a divergência do feixe por <sup>[10]</sup>:

$$\varphi_{63} = \frac{\lambda}{\pi \times d_{63}} \quad (2.5.14)$$

Sendo

$\varphi_{63}$  Divergência do feixe de laser;

$\lambda$  Comprimento de onda.

#### 2.5.4 MEDIDA DE DIVERGÊNCIA DA RADIAÇÃO DE LASERS

Esta medida por sua vez será importante para a determinação da divergência do feixe  $\varphi_{63}$ . O ângulo é dado rad ou mrad. Então, através do diâmetro do feixe do cone temos <sup>[10]</sup>:

$$\varphi_{63} = 2 \times \arctan \frac{d_{63} - d'_{63}}{2 \times r} \quad (2.5.15)$$

Sendo:

$d_{63}$  diâmetro do feixe em uma distância  $z$ ;

$d'_{63}$  diâmetro do feixe em uma distância  $z+r$  e

$\varphi_{63}$  divergência do feixe.

Por exemplo, se o laser apresenta uma divergência de 50mrad, isto quer dizer que a cada 1000mm de distância do laser, o feixe diverge 50mm.

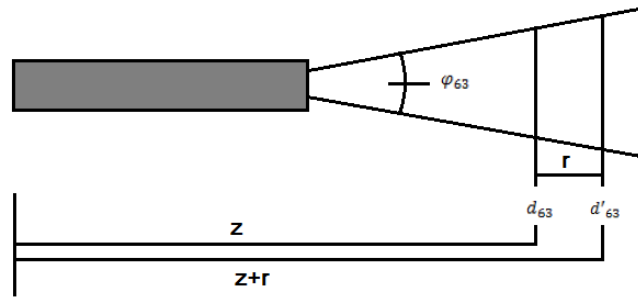


Figura 2.15 Figura mostrando as variáveis para o calcular a divergência do feixe de laser

### 2.5.5 DISTÂNCIA DE SEGURANÇA (NOHD)

A distância de segurança, no inglês nominal ocular hazard distance (NOHD), é a distância da fonte na qual a intensidade e as energias caem abaixo das energias de risco (energias que podem causar danos ao tecido). O cálculo de NOHD irá ajudar a entender e gerenciar os riscos que os lasers apresentam. Para cw-lasers usa-se a seguinte equação <sup>[10]</sup>:

$$NOHD = \frac{\sqrt{\frac{4 \times P}{\pi \times E_{EGW}}} - d_{63}}{\varphi_{63}} \quad (2.5.16)$$

E para *lasers pulsado*:

$$NOHD = \frac{\sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times H_{EGW}}} - d_{63}}{\varphi_{63}} \quad (2.5.17)$$

Sendo:

$d_{63}$  o diâmetro inicial do feixe;

$\varphi_{63}$  a divergência;

P o desempenho;

Q a energia;

$E_{EGW}$  o limite de exposição para cw-laser e

$H_{EGW}$  o limite de exposição para impuls-laser.

## 2.5.6 EXEMPLOS DE CÁLCULOS

Todos os exemplos de cálculos foram retirados do livro do curso “Laserschutzbeauftragte” [10].

### ◆ Exemplo 1

Um feixe laser tem uma potência de  $P = 1\text{mW} = 10^{-3}$ . Calcule a densidade de potência  $E$  para os seguintes raios do feixe:

a)  $r = 10\text{ }\mu\text{m} = 10^{-5}\text{ m}$  (na retina do olho);

b)  $r = 1\text{mm} = 10^{-3}\text{ m}$  (em um olhar direto);

c) Calcule a densidade de potência  $E$  de um ferro de passar roupa com  $1\text{kW} = 1000\text{W}$  e uma área de  $100\text{cm}^2 = 10^{-2}\text{ m}^2$ .

Fórmulas:  $E = P/A$ ;

$$A = r^2\pi.$$

Resolução:

$$a) E = \frac{P}{A} = \frac{P}{r^2\pi} = \frac{10^{-3}}{10^{-10}\pi} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 3,2 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2};$$

$$b) E = \frac{P}{A} = \frac{P}{r^2\pi} = \frac{10^{-3}}{10^{-6}\pi} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 3,2 \cdot 10^2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2};$$

$$c) E = \frac{P}{A} = \frac{P}{r^2\pi} = \frac{1000}{10^{-2}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 10^5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2};$$

A densidade de potência  $E$  no olho devido ao ponteiro laser com  $1\text{mW}$  focado na retina é cerca de 32 vezes maior do que para um ferro de passar roupa.

◆ Exemplo 2

Um laser com área de  $A=72 \text{ mm}^2 = 72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  tem uma potência de  $P=350 \text{ mW} = 0,35 \text{ W}$  e um tempo de irradiação de  $t=10\text{s}$ . Calcule:

- a) A energia;
- b) A densidade de energia do feixe H;
- c) A densidade de potência do feixe E.

Fórmulas:  $Q = P * t$ ;

$$H = Q/A;$$

$$E = H/t.$$

Resolução:

a)  $Q = P * t = 0,35 * 10 \text{ Ws} = \mathbf{3,5 J}$

b)  $H = \frac{Q}{A} = \frac{0,35}{72 \cdot 10^{-6}} \frac{\text{J}}{\text{m}^2} = \mathbf{4,5 \cdot 10^4 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}}$

c)  $E = \frac{H}{t} = 4,5 \cdot \frac{10^4}{10} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \mathbf{4,5 \cdot 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$

◆ Exemplo 3

Um laser de  $\text{CO}_2$  com largura de pulso de  $t=1\mu\text{s}$  e pulso de energia de  $Q=0,1\text{J}$ .

- a) Quanto é a potência de pico  $P_P$ ?
- b) Quanto é a potência média  $P_0$  de um pulso com frequência de  $f=500\text{Hz}$ ?
- c) Se o feixe laser tem uma área de  $A=10\text{mm}^2$ . Quanto é a irradiância E e a exposição H de um único pulso?

Fórmulas:  $P_P = Q/t$ ;



$$P_0 = Q * f;$$

$$E = P_P/A;$$

$$H = Q/A.$$

*Resolução:*

$$a) P_P = \frac{Q}{t} = \frac{0,1}{10^{-6}} \frac{J}{s} = \mathbf{10^5 W};$$

$$b) P_0 = Q * f = 0,1 * 500 \frac{J}{s} = \mathbf{50W};$$

$$c) E = \frac{P_P}{A} = \frac{10^5}{10} \cdot 10^{-6} \frac{W}{m^2} = \mathbf{10^{10} \frac{W}{m^2}};$$

$$H = \frac{Q}{A} = \frac{0,1}{10 \cdot 10^{-6}} \frac{J}{m^2} = \mathbf{10^4 \frac{W}{m^2}}.$$

#### ◆ Exemplo 4

Um feixe de um laser de raio  $R=0,5\text{mm}$  diverge com um ângulo de divergência de  $\varphi = 1\text{mrad} = 10^{-3}$ . Qual o raio  $R$  o feixe tem nas seguintes distâncias.

a) 10m

b) 100m

c) 1km

*Fórmulas:*  $R = z \cdot \tan\varphi$

$$R \approx z \varphi / 2$$

*Resolução:*

$$a) R = 10 * 0,5 * 10^{-3}m = 0,005m = 0,5cm$$

$$b) R = 100 * 0,5 * 10^{-3}m = 0,05m = 5cm$$

$$c) R = 10000 * 0,5 * 10^{-3}m = 0,5m = 50cm$$

### 3 CAPÍTULO – FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS



Este capítulo trata da razão fundamental de se fazer uma avaliação de risco, como demandada pelos documentos alemães. Será abordado nesta parte do trabalho como a radiação óptica interage com os materiais e, conseqüentemente, tecidos humanos. O objetivo é explicitar os possíveis danos que podem ser causados pela radiação caso não usada corretamente.

Cada meio ativo produz luz em um comprimento de onda específico e cada comprimento de onda reage de uma maneira diferente com cada tecido. Além do comprimento de onda, outros fatores interferem nesta interação, são eles: densidade de potência; forma da emissão laser (contínua ou pulsada); tempo de duração do pulso e da irradiação, distância, divergência do feixe, entre outros fatores físicos que foram abordados no capítulo 1 deste trabalho. Neste capítulo será visto que as propriedades ópticas de cada tecido vão determinar também a extensão e a natureza da resposta tecidual, que ocorre nos processos de absorção, transmissão, reflexão e diusão do laser.

Na segunda parte do capítulo, cinco diferentes mecanismos de interação serão abordados da radiação óptica com os tecidos: interação fotoquímica, interação termal, fotoablação, ablação por plasma induzido, e fotodisrupção.



### 3.1 CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DOS TECIDOS

Neste capítulo será discutido fenômenos básicos que ocorrem quando a matéria é exposta a luz. A radiação eletromagnética pode interagir com os tecidos de diversas maneiras. Na figura 3.1 mostra uma situação típica, onde feixe de luz incide em uma fatia de um material. Ocorrem, em princípio, três efeitos: (1) reflexão e refração, (2) absorção, (3) espalhamento. A Reflexão e a refração estão fortemente conectadas pela *lei de Fresnel* e por isso ambos efeitos serão abordados em conjunto.

Apenas fótons não absorvidos, não refletidos e espalhados na direção do feixe irão contribuir para a intensidade detectada através da fatia do material. A razão de onda transmitida e incidente é chamada de *transmitância*. A percentagem de perdas, por reflexão, absorção ou espalhamento, depende do tipo do material e, sem dúvidas, com o comprimento de onda da luz incidente <sup>[2]</sup>.

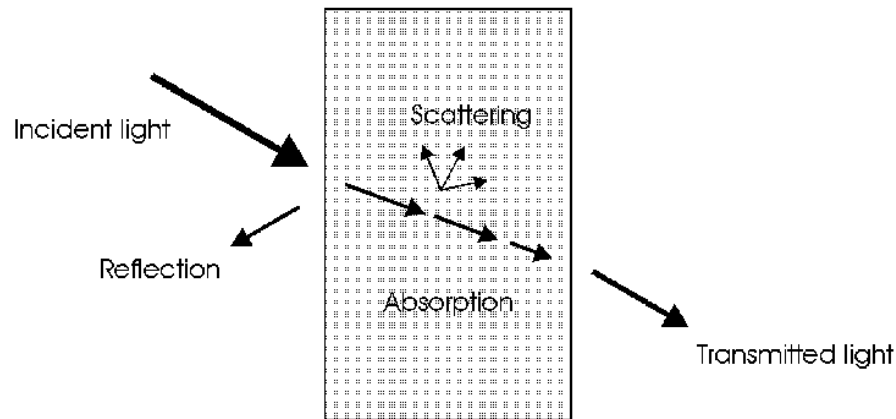


Figura 3.1 Geometria de reflexão, refração, absorção e espalhamento [3].

### 3.1.1 REFLEXÃO E REFRAÇÃO

*Reflexão* é definida como a radiação magnética que retorna da superfície na qual incidiu. A simples lei da reflexão requer que ondas normais incidentes e refletidas e o vetor normal da superfície fiquem no mesmo plano, chamado de *plano de incidência* (Figura 3.2). Este também afirma que o ângulo de reflexão  $\theta'$  é igual ao ângulo de incidência. Estes ângulo são medidos a partir do vetor normal da superfície com o do feixe incidente e refletido [3].

$$\theta' = \theta \quad (3.1.1)$$

É importante lembrar que a superfície é tomada como se suas irregularidades fossem menores que o comprimento de onda da radiação. Resultando no chamado *reflexão especular*. Já no caso em que as irregularidades são maiores ou até comparáveis com o comprimento de onda da radiação, ocorrerá a *reflexão difusa*, esse tipo de reflexão é um fenômeno comum a todos os tecidos [3].

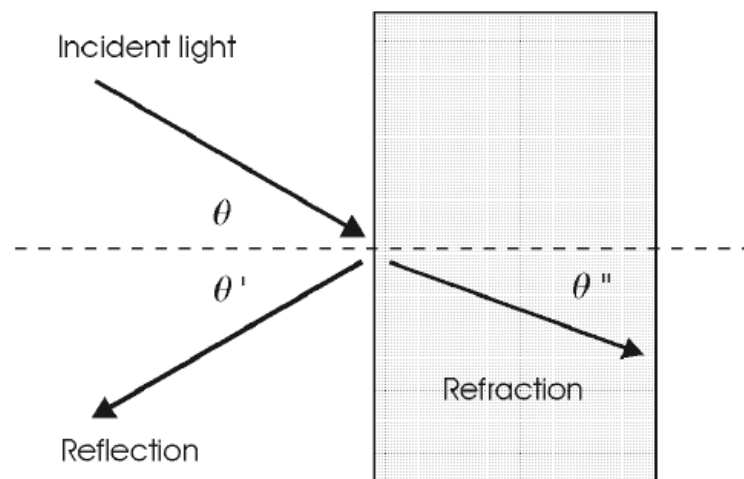


Figura 3.2 Geometria de reflexão e refração [3].

Já a *refração* geralmente ocorre quando dois meios de superfícies reflectora separam dois meios de diferentes índices de refração. Isso origina-se de uma mudança na velocidade da luz. A relação matemática que rege a refração é conhecido como Lei de Snell, dada por [3]:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta''} = \frac{v}{v'} \quad (3.1.2)$$

Sendo:

$\theta''$  ângulo de refração;

$v$  velocidade da luz do feixe incidente;

$v'$  velocidade da luz do feixe refratado.

Sabendo que os índices de refração são definidos por:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.1.3)$$

Sendo:

c velocidade da luz no vácuo.

Então, a equação (3.1.2) pode ser reescrita como:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta'' \quad (3.1.4)$$

No caso de  $\sin \theta > n'/n$ , significa que a refração não irá ocorrer e acontecerá o fenômeno chamado de *reflexão total*.

A *reflexividade* de uma superfície é definida como a razão da amplitude dos campos elétricos refletidos e incidentes (dadas pelas equações 3.1.5). A *reflectância* é a razão das intensidades correspondentes e igual a raiz da reflexividade (dadas pelas equações 3.1.6). Reflexividade e reflectância dependem do ângulo de incidência, da polarização da radiação e do índice de refração dos materiais. As relações entre reflexividade e reflectância são encontradas nas *equações de Fresnel*. Neste trabalho haverá a preocupação apenas em considerar o impacto físico das equações, sem focar em suas derivações matemáticas. As leis de Fresnel são dadas por [3]:

$$\frac{E'_s}{E_s} = -\frac{\sin(\theta - \theta'')}{\sin(\theta + \theta'')}; \quad (3.1.5a)$$

$$\frac{E'_p}{E_p} = \frac{\tan(\theta - \theta'')}{\tan(\theta + \theta'')}; \quad (3.1.5b)$$

$$\frac{E''_s}{E_s} = \frac{2 \sin(\theta'') \cos(\theta)}{\sin(\theta + \theta'')}; \quad (3.1.5c)$$

$$\frac{E''_p}{E_p} = \frac{2 \sin(\theta'') \cos(\theta)}{\sin(\theta + \theta'') \cos(\theta - \theta'')}. \quad (3.1.5d)$$

Sendo:

E amplitude do vetor campo elétrico incidente

$E'$  amplitude do vetor campo elétrico refletido

$E''$  amplitude do vetor campo elétrico refratado

Os subscritos “s” e “p” significam os planos de oscilação, sendo o “s” o plano perpendicular, do alemão “senkrecht”, e “p” o plano perpendicular ao plano de incidência [3].

As reflectâncias  $R_s$  e  $R_p$  nos planos são dadas por:

$$R_s = \left( \frac{E'_s}{E_s} \right)^2 ; \quad (3.1.6a)$$

$$R_p = \left( \frac{E'_p}{E_p} \right)^2 . \quad (3.1.6b)$$

Com as equações dadas até agora, pode-se obter, através de substituições, uma relação entre a reflectância e o ângulo de incidência. A figura 3.3 mostra esta relação, onde a reflectâncias é plotada como função dos ângulos de incidência. Nesta figura foi assumido os índices de refração para ar ( $n=1$ ) e para água ( $n'=1,33$ ). O ângulo onde  $R_p=0$  é chamado de *ângulo de Brewster*. No caso desta figura, este ângulo corresponde a  $53^\circ$ . A reflectância a  $0^\circ$  é de cerca de 2% em ambos os planos. [3].

Percebe-se ainda da figura 3.3 que até um ângulo de aproximadamente  $15^\circ$ , a reflectância apresenta pouca variação. Para ângulos maiores a reflectância chega á metade (50%) no plano “s” em ângulo perto de  $82^\circ$  e para o plano “p” ângulos perto de  $85^\circ$  [3].

Em muitos casos, esta fração da radiação incidente não é desprezível. Por isso, em relação a segurança laser, esta é umas das principais razões pela qual o óculos protetor é sempre preciso [3].

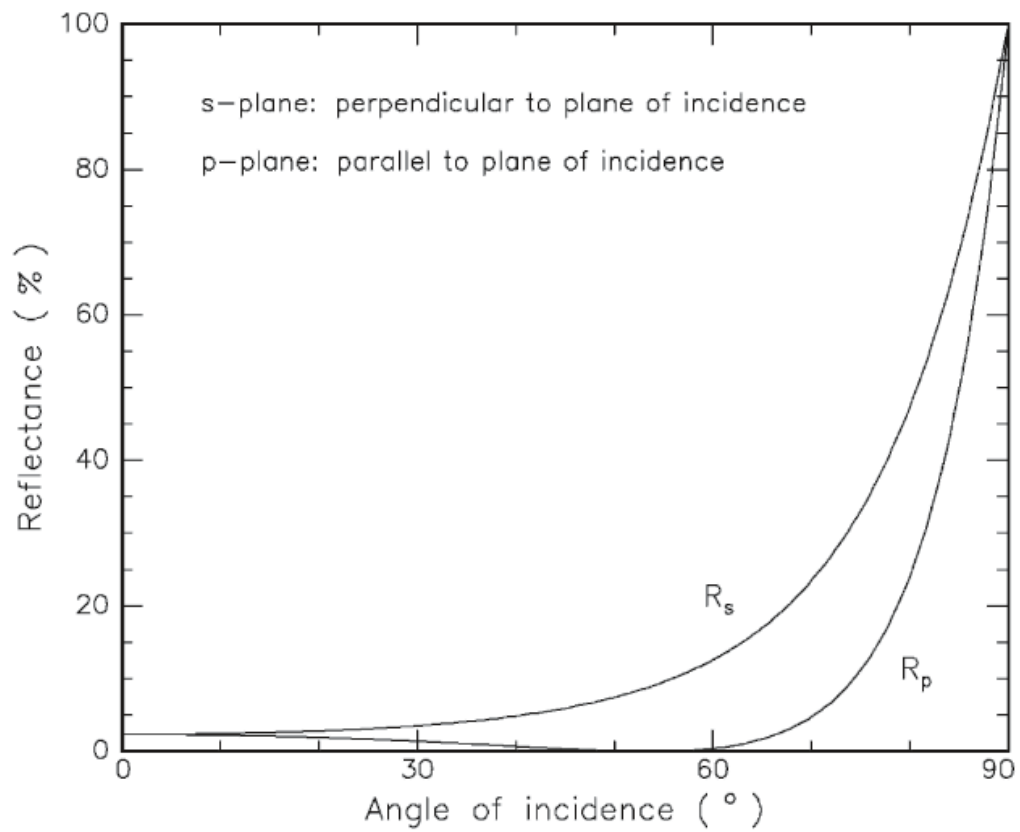


Figura 3.3 Reflectâncias nos planos -s e -p para ar e água ( $n=1,33$ ) [3].

A tabela 3.4 mostra a relação da variação do índice de refração e da reflectância para diferentes comprimentos de onda. Percebe-se que duas bandas de alta absorção que ocorrem entre  $2,9\mu\text{m}$  e  $6,0\mu\text{m}$  [3].



Comprimento de Onda $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Índice de refração $n$	Reflectância $R$
0,2	1,396	0,027
0,3	1,349	0,022
0,4	1,339	0,021
0,5	1,335	0,021
0,6	1,332	0,020
0,7	1,331	0,020
0,8	1,329	0,020
0,9	1,328	0,020
1,0	1,327	0,020
1,6	1,317	0,019
2,0	1,306	0,018
2,6	1,242	0,012
2,7	1,188	0,007
2,8	1,142	0,004
2,9	1,201	0,008
3,0	1,371	0,024
3,1	1,467	0,036
3,2	1,478	0,037
3,3	1,450	0,034
3,4	1,420	0,030
3,5	1,400	0,028
4,0	1,351	0,022
5,0	1,325	0,020
6,0	1,265	0,014
7,0	1,317	0,019
8,0	1,291	0,016
9,0	1,262	0,013
10,0	1,218	0,010

Tabela 3.1 Índices de refração e reflectâncias para a água. Dados de acordo com Hale e Querry (1973) <sup>[3]</sup>.

Em geral, os índices de refração para vários tipos de tecidos são difíceis de medir devido a absorção e o espalhamento. Consequentemente, a reflexão destes tecidos devem ser medidas empiricamente [3].

### 3.1.2 ABSORÇÃO

Durante a *absorção* a intensidade da onda eletromagnética é atenuada enquanto passa pelo meio. A absorbância do médio é definida pela razão das intensidades absorvida e incidente. Absorção é devido à conversão parcial de energia da luz em calor (movimento), em certas vibrações das moléculas no material que a absorveu [3].

Um meio perfeitamente *transparente* permite a passagem da luz sem qualquer absorção. Entre os tecidos biológicos, córnea e cristalino podem ser considerados como sendo altamente transparentes para a luz visível. Já o maio *opaco*, ocorre o contrário, a radiação é reduzida praticamente a zero em certos comprimentos de onda. Porém os termos “transparente” e “opaco” são relativos, e dependem do comprimento de onda no qual esta se falando. Por exemplo, para o cristalino e a córnea, as quais consistem basicamente de água, mostram uma alta absorção em comprimentos de onda do espectro infravermelho, por isso o tecido é considerado opaco nessa região do espectro. Atualmente, não há nenhum tecido considerado transparente ou opaco para todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético [3].

A habilidade do meio de absorver radiação eletromagnética depende de inúmeros fatores, principalmente a constituição eletrônica dos átomos e moléculas, o comprimento de onda da radiação, a espessura da camada absorviva e parâmetros internos como temperatura ou concentração de agentes absorvivos. Duas leis são frequentemente aplicadas para descrever o efeito ou espessura ou concentração de

absorção, respectivamente. Eles são comumente chamados de *Lei de Lambert* e *Lei de Beer*, e são expressos por [3]:

$$I(z) = I_0 e^{-(\alpha \times z)}; \quad (3.1.7)$$

$$I(z) = I_0 e^{-(k' \times c \times z)}. \quad (3.1.8)$$

Sendo:

$z$  Eixo óptico;

$I(z)$  Intensidade em uma distância  $z$ ;

$I_0$  Intensidade incidente;

$\alpha$  Coeficiente absorptivo do meio;

$c$  Concentração dos agentes absorptivos;

$k'$  Depende de outros parâmetros de concentração internos.

A partir destas duas leis que descrevem o mesmo comportamento de absorção, pode-se juntá-las, e ficam conhecidas como *Lei de Lambert-Beer*, podendo serem escritas da seguinte forma [3]:

$$z = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{I_0}{I(z)} \right) \quad (3.1.9)$$

O inverso do coeficiente de absorção  $\alpha$  é, também, relacionado ao *comprimento de absorção*,  $L$ , por:

$$L = \frac{1}{\alpha} \quad (3.1.10)$$

O comprimento de absorção mede a distância  $z$  na qual a intensidade  $I(z)$  cai a  $1/e$  do valor de intensidade inicial  $I_0$ .

A absorção em tecidos biológicos deve-se principalmente a moléculas de água ou macromoléculas como proteínas e pigmentos. Na região IR do espectro, a absorção é causada predominantemente pelas moléculas de água. Já na região UV do espectro, a absorção é causada predominantemente pelas proteínas e pigmentos [3].

Neste subcapítulo sobre absorção é importante entender e avaliar os espectro de absorções de tecidos em determinados comprimentos de onda. Entre outras razões, a quantidade que um tecido absorve em um comprimento de onda auxiliará a escolher um determinado tipo de laser para um certo tratamento. A seguir será avaliado dois gráficos que ajudarão a entender mais sobre o assunto [3].

Na figura 3.4. o espectro de absorção da melanina e da hemoglobina ( $\text{HbO}_2$ ) são mostrados. Melanina é um pigmento básico da pele e um dos mais importantes cromóforos (conjuntos de moléculas responsáveis pela cor de determinado tecido) da epiderme. Sua absorção cresce sem muitas variações do espectro visível para o espectro UV. Já a hemoglobina é predominante em tecidos vascularizados. A hemoglobina apresenta picos de absorção em aproximadamente 280nm, 420nm, 540nm, 580nm, e 600nm. Na região de comprimentos de onda entre 600nm e 1200nm, nem macromoléculas nem moléculas de água apresentam fortes absorções. Essa parte de baixa absorção é comumente chamada de “janela terapêutica”, onde a radiação pode penetrar sem perdas significativas, e por isso proporciona um tratamento em estruturas mais internas do corpo humano [3].

Na figura 3.5, é apresentado o espectro de absorção obtido para pele, parede aórtica, e córnea. Pode-se notar que a pele é o tecido mais absorvedor, enquanto que a córnea é quase que perfeitamente transparente na região visível do espectro [3].

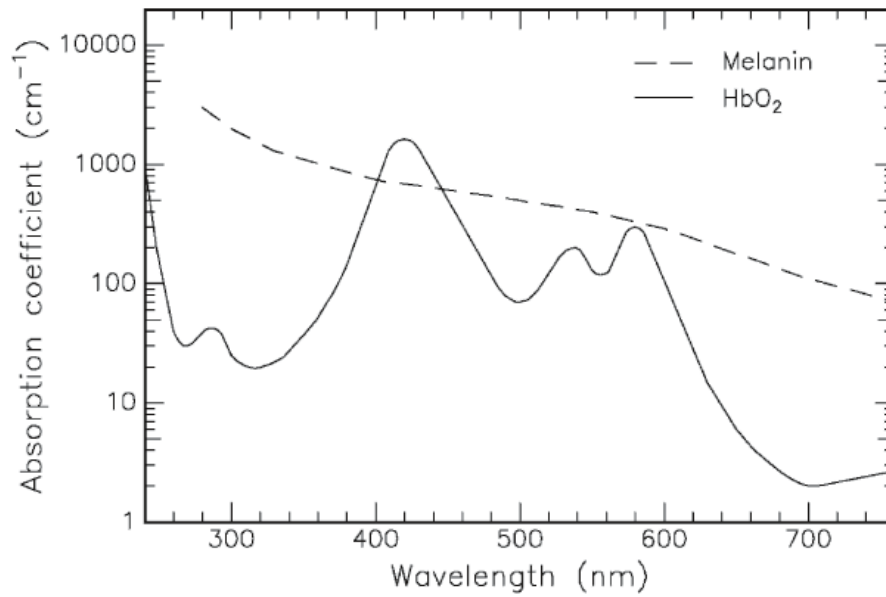


Figura 3.4 Espectro de absorção da melanina na pele e da hemoglobina ( $\text{HbO}_2$ ) no sangue. Picos de absorção da hemoglobina são vistos em 280nm, 420nm, 540nm, 580nm, e 600nm. Dados de acordo com Boulnois (1986) e retirados do livro Laser-Tissue Interactions de Markolf H. Niemz, 3ed [3].

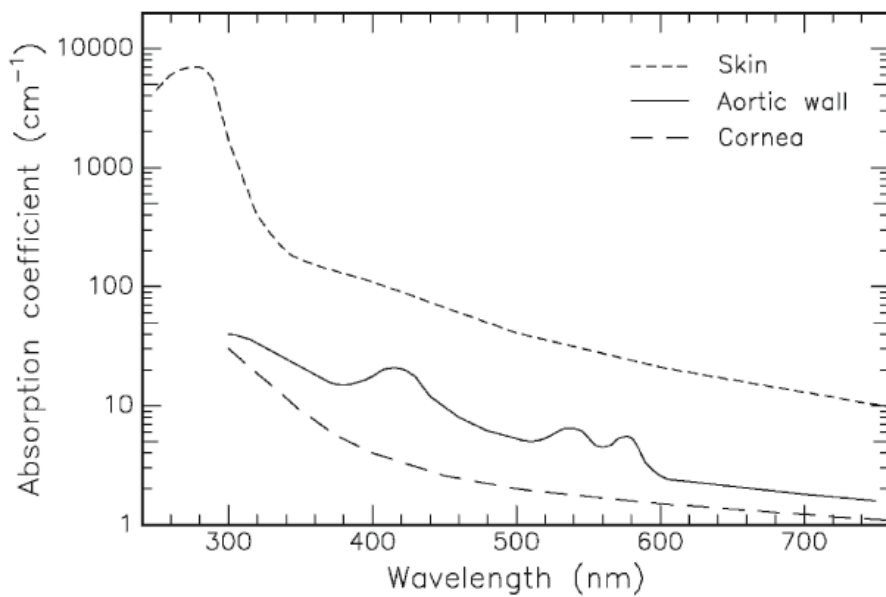


Figura 3.5 Espectro de absorção da pele, da parede aórtica e da córnea. Na região do visível, a absorção da pele é 20-30 vezes maior que o tecido da córnea. O espectro de absorção da parede aórtica exibe similar pico como o da hemoglobina. Dados de acordo com Parish and Anderson (1983), Keijzer et al. (1989), e Eichler e Seiler (1991) e retirados do livro Laser-Tissue Interactions de Markolf H. Niemz, 3ed [3].

Na comparação dos dois espectros das figuras 3.4 e 3.5, nota-se uma similaridade entre o espectro da parede aórtica e o da hemoglobina, o que se já é de se esperar pelo fato da parede aórtica ser altamente irrigada, mostrando picos de absorção similares com os da hemoglobina. Pelas figuras, torna-se evidente o motivo pelo qual o laser de Krypton, que emite nas faixas amarela(568) e verde(531nm), são usados como coaguladores de sangue. Por conta dessa alta absorção, o uso do laser se torna mais eficiente nos tratamentos, e, conseqüentemente, tecidos adjacentes acabam sendo menos prejudicados [3].

### 3.1.3 *ESPALHAMENTO*

Quando partículas carregadas são expostas a ondas eletromagnéticas, as partículas são colocadas em movimento pelo campo eletromagnético. Se a frequências da onda for igual a frequência natural de vibração livre de elétrons, ocorrerá ressonância com considerável quantidade de absorção. Já, se a frequência não for igual à frequência de vibração livre do elétrons, ocorrerá *espalhamento* [3].

Espalhamento elástico e inelástico são distintos, dependendo se parte da energia cinética do fótons incidente é transformada ou não no processo de espalhamento. No espalhamento elástico a energia do fótons incidente e espalhado são iguais. Um tipo especial de espalhamento é o *espalhamento Rayleigh*. A lei de Rayleigh para espalhamento mostra duas relações interessantes ao presente trabalho, em uma há a relação entre a intensidade espalhada e o índice de refração, e a segunda é que o espalhamento é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda. A lei pode ser escrita da seguinte forma abreviada, tomando em consideração apenas o ângulo de espalhamento e o comprimento de onda [3]:

$$I_s(\theta) \sim \frac{1 + \cos^2(\theta)}{\lambda^4} \quad (3.1.11)$$

Onde  $\theta = 0$  é referido a um espalhamento para frente, e a equação (3.1.11) não considera nenhuma absorção. A lei de Rayleigh é plotada na figura 3.6.

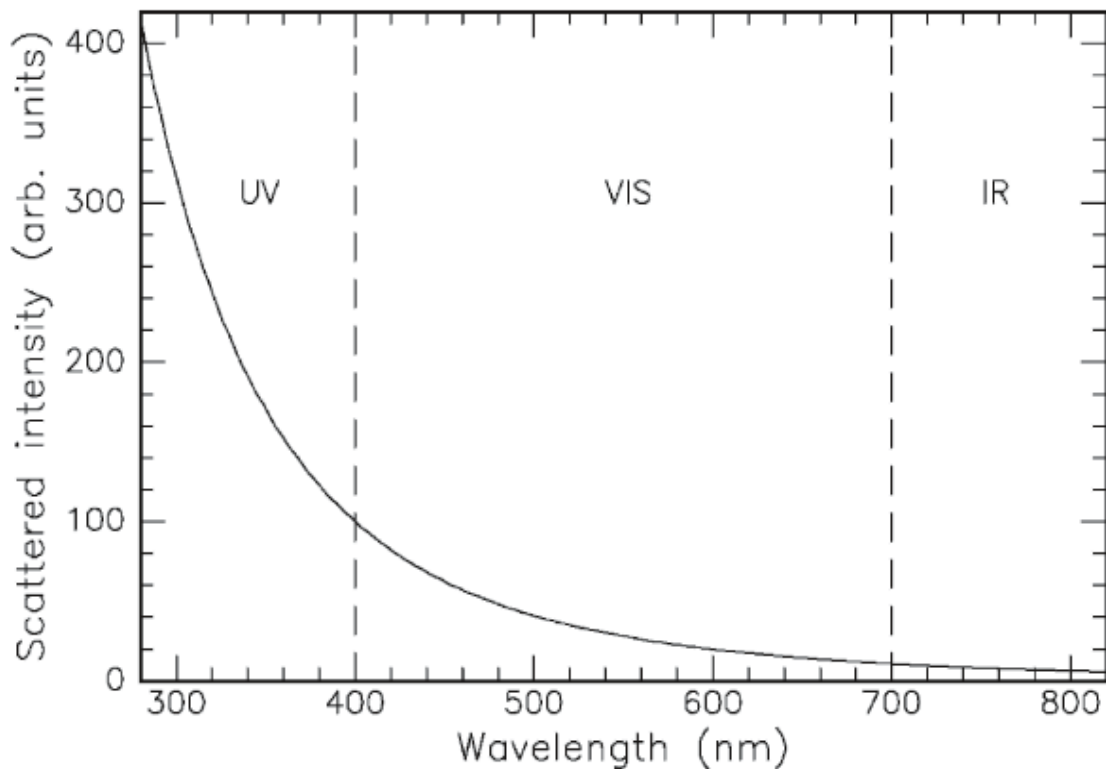


Figura 3.6 Lei de Rayleigh de espalhamento para luz próxima do UV, visível e próxima do IR [3].

O efeito Rayleigh não leva em consideração a extensão espacial da partícula em questão. Nos casos onde a extensão espacial da partícula começa a se tornar comparável com o comprimento de onda incidente, o efeito Rayleigh não pode ser mais aplicado e para isso existe outro efeito chamado de *espalhamento Mie*. A teoria do espalhamento Mie é complexa e acaba por desviar o foco deste trabalho caso abordada. Contudo, vale ressaltar a diferença entre o espalhamento Mie e o Rayleigh, os quais diferem em dois importantes aspectos. Primeiro, o espalhamento Mie mostra

uma dependência com o comprimento de onda não tão forte ( $\sim \lambda^x$ , sendo  $0,4 \leq x \leq 0,5$ ) quanto Rayleigh ( $\sim \lambda^4$ ). E segundo, os espalhamentos Mie acontecem preferencialmente na direção progressiva, enquanto que o espalhamento Rayleigh é proporcional a  $1 + \cos(\theta)$ , de acordo com a equação (3.1.11) [3].

Porém, nos estudos de Wilson e Adam (1983), Jacques et. al. (1987b), e Parsa et al. (1989) mostram que, na realidade, fótons são espalhados preferivelmente na direção progressiva, o que não pode ser explicado pelo espalhamento Rayleigh. Por outro lado, a dependência com o comprimento de onda é muito mais intensa do que previsto pelo espalhamento Mie. Conclui-se, então, que nenhum dos dois tipos de espalhamento descrevem completamente o que acontece nos tecidos. Por causa disso, é conveniente definir uma função de probabilidade,  $p(\theta)$ , dos fótons serem espalhados em um determinado ângulo,  $\theta$ . Se a função  $p(\theta)$  não depende de  $\theta$ , pode-se chamar *espalhamento isotrópico*, se não, chama-se, *espalhamento anisotrópico*. A medida da anisotropia é dada pelo coeficiente de anisotropia,  $g$ , dado pela equação [3]:

$$g = \frac{\int_0^{4\pi} p(\theta) \cos(\theta) dw}{\int_0^{4\pi} p(\theta) dw} \quad (3.1.12)$$

Onde  $g = 1$  denota espalhamentos estritamente progressivos,  $g = -1$ , apenas retroespalhamentos e  $g = 0$ , espalhamento isotrópicos. Pode-se dizer, com uma boa aproximação que  $g$  varia de 0,70 a 0,99 para a maioria dos tecidos humanos. Isso quer dizer que, os ângulos de espalhamento variam geralmente em torno de  $8^\circ$  a  $45^\circ$  [3].

A função de probabilidade,  $p(\theta)$ , é também chamada de *função de fase* e muitas funções já foram propostas em diversos estudos como *Henyey–Greenstein*, *Rayleigh–Gans*,  *$\delta$ –Eddington*, e *funções de Reynolds*. Neste trabalho será apresentado apenas a função introduzida por *Henyey and Greenstein* (1941) pelo fato



de apresentar uma boa concordância com os dados experimentais. Após algumas modificações na função original proposta, a função é dada por [3].

$$p(\theta) = \left(\frac{1}{4\pi}\right) \left( \frac{u + (1-u)(1-g^2)}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (3.1.13)$$

A figura 3.7 mostra dados experimentais obtidos para um pedaço de tecido da parede aórtica e fitado com a função de fase (3.1.13) de *Henyey and Greenstein modificada*. A figura descreve claramente a preferência pelo espalhamento na direção frontal (progressiva do feixe) [3].

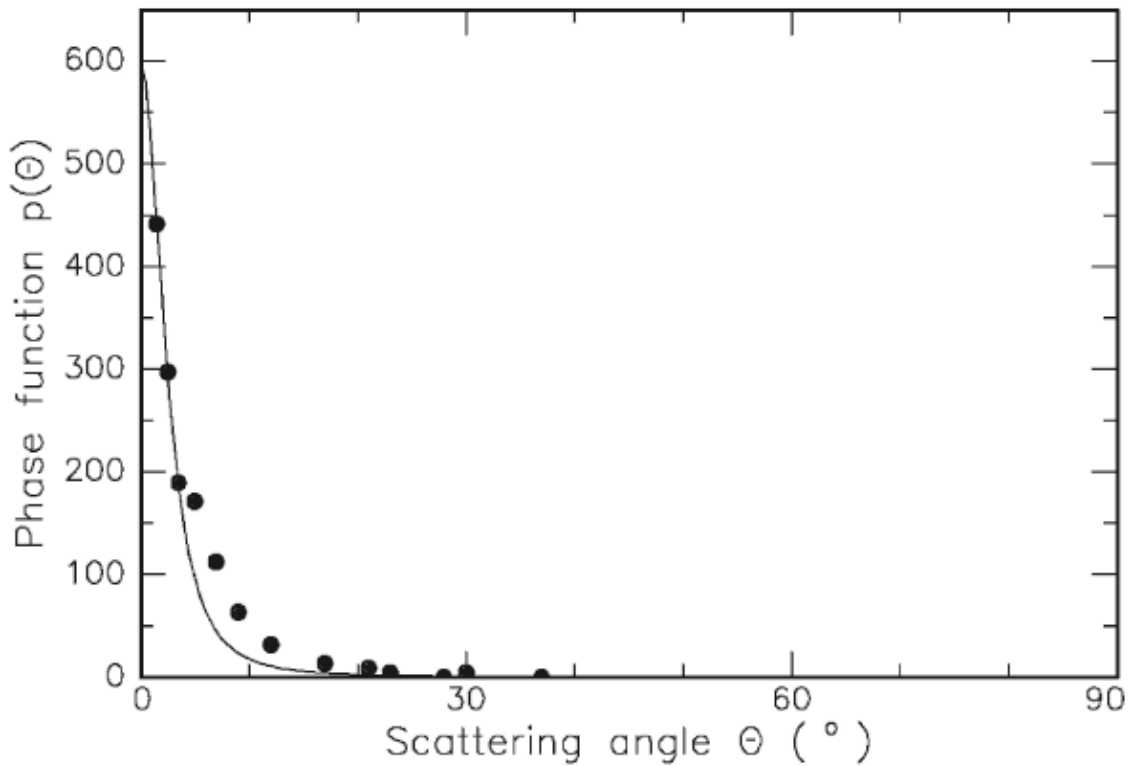


Figura 3.7 Função de fase (função de probabilidade) para uma amostra de 80µm da parede aórtica. Os dados foram fitados conforme a função de Henyey-Greenstein (os parâmetros usados foram:  $g=0,945$  e  $u=0,071$ ). Os dados obtidos estão de acordo com Yoon et al. (1987) [3].

(PERGUNTA: Não foi encontrado como que estas probabilidades de espalhamentos dependem em relação ao comprimento de onda!)

Um dos importantes tipos de espalhamento inelástico é o *espalhamento Brillouin*. Este tipo de espalhamento aumenta ou diminui frequências da luz pelo fato de estar se deslocando para longe ou para próximo da fonte de luz. Em vista disso, esse efeito pode ser relacionado a um *efeito Doppler óptico* pelo fato de estar mudando frequências. Em relação as interações da luz com os tecidos, esse tipo de espalhamento se torna significativo quando ocorre a geração de choque de ondas [3].



### 3.2 MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO LASER

Uma variedade de mecanismos de interações podem ocorrer quando se aplica a luz laser em tecidos biológicos. As mais importantes características ópticas são coeficiente de reflexão, absorção e espalhamento. Juntos eles determinam a transmissão total do tecido em um determinado comprimento de onda. Por outro lado, os seguintes parâmetros são dados pela própria radiação laser: comprimento de onda, tempo de exposição, energia aplicada, tamanho de ponto focal e densidade de potência. Entre estes, o tempo de exposição é o parâmetro mais crucial quando selecionado um tipo de interação [3].

A figura 3.7 expressa no eixo das ordenadas a irradiância em  $W/m^2$  e no eixo das abscissas o tempo. Das linhas diagonais mostram uma fluência constante de energia de  $1mJ/cm^2$ ,  $1J/cm^2$ , e  $1kJ/cm^2$ . A escala de tempo pode ser dividida

basicamente em cinco seções: onda contínua ou tempos de exposições  $> 1\text{s}$  para *interações fotoquímicas*,  $1\text{min}$  a  $1\mu\text{s}$  para *interações térmicas*,  $1\mu\text{s}$  a  $1\text{ns}$  para *fotoablação*, e  $< 1\text{n}$  para *ablação de plasma induzido* e *fotodisrupção*. A diferença entre os dois últimos se dá por causa da diferença e densidades de energia do feixe e esta associado basicamente com ionizações. Já os demais efeitos estão associados com ionizações também porém basicamente com efeitos mecânicos <sup>[13]</sup>.

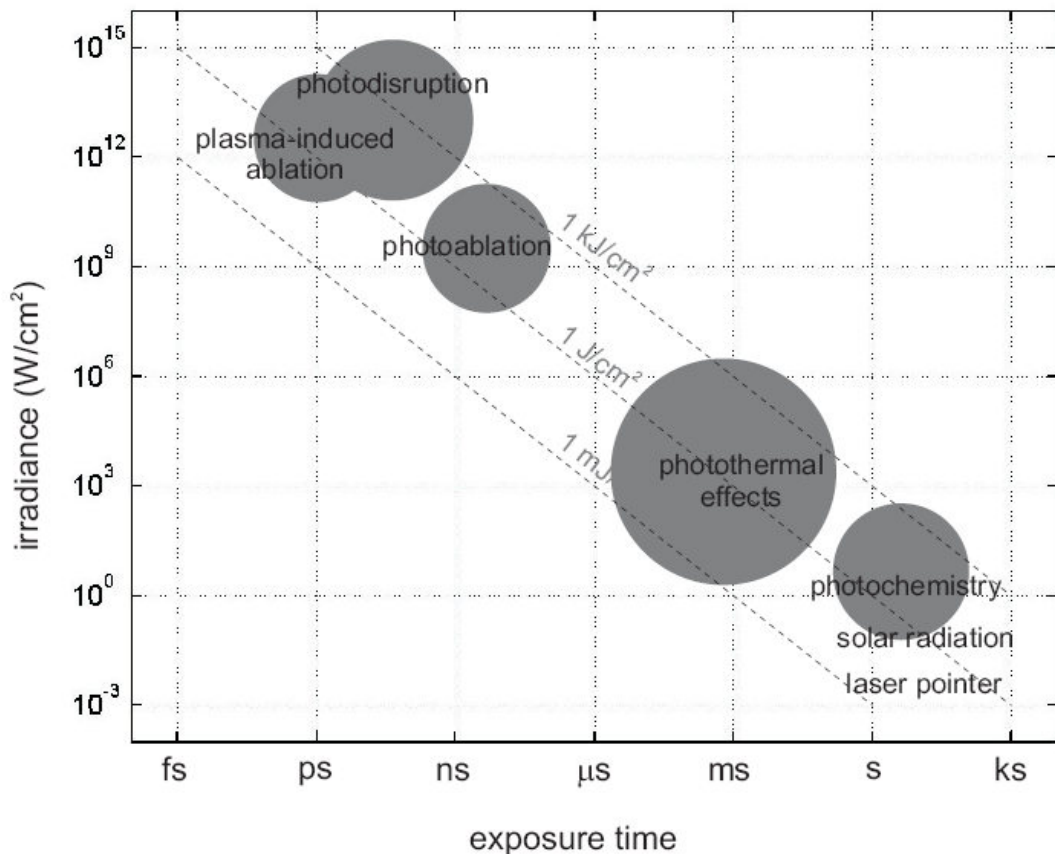


Figura 3.8 Visão geral de diferentes tipos de interação laser-tecido, irradiância e a exposição na qual eles predominam. Os círculos são apenas um número estimado dos parâmetro do laser associado <sup>[13]</sup>.

A figura 3.7 mostra os cinco tipos de mecanismos de interação dependentes do tempo de duração da exposição e a radiância (taxa de fluência, ou seja, energia entregue por unidade de área por unidade de tempo) <sup>[13]</sup>.

Para ter ideia da magnitude destas radiações, a média de irradiação na superfície da terra devido ao sol é de 0,14 W/cm<sup>2</sup>, e a irradiação de um ponteiro de laser padrão de 1mW com ponto de radio 1mm é [13].

$$I_R = \frac{P}{\pi \times r^2}$$

$$I_R = \frac{0,001}{\pi \times (0,001)^2}$$

$$I_R = 0,03 \frac{W}{cm^2}$$

Para cirurgia ocular com laser a irradiação pode chegar a trinta ordens de magnitude maior do que 10<sup>12</sup> W/cm<sup>2</sup> [13].

### 3.2.1 EFEITO FOTOQUÍMICO

O grupo de interações fotoquímicas teve origem em observações empíricas que a luz pode induzir efeitos e reações químicas dentro de macromoléculas ou tecidos. Interações fotoquímicas ocorrem em densidade de potências muito baixas (tipicamente 1W/cm<sup>2</sup>) e longas exposições de tempo de pulsos de segundos à onda contínua. A determinação dos parâmetros do laser fornece a distribuição de radiação nos tecidos que é determinada pelo fenômeno de espalhamento. Este é um importante ponto a ser avaliada para casos onde estruturas mais internas ou externas devem ser alcançadas. O efeito fotoquímico não apresenta nenhuma observação macroscópica [3].

No campo da medicina, este tipo de efeito tem papel fundamental na *terapia fotodinâmica* (do inglês “*photodynamic therapy (PDT)*”). Na terapia fotodinâmica, um droga fotossensibilizante (conectadas cromóforos, moléculas sofrem reações quando absorvem radiações em determinado comprimento de onda) é usada para causa a

necrose (morte celular) e a apoptose (morte celular programada). A terapia fotodinâmica tem se ampliado fortemente na oncologia para destruir tumores [3].

Resumo sobre informações típicas de interações fotoquímicas [3]:

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| ◆ Lasers típicos:                  | Laser de corante vermelho, laser diodo. |
| ◆ Durações de pulsos típicos:      | 1s ... CW                               |
| ◆ Densidades de potências típicas: | 0,01... 50 W/cm <sup>2</sup>            |
| ◆ Aplicações especiais:            | Terapia fotodinâmica.                   |

### 3.2.2 EFEITO TÉRMICO

O efeito térmico é composto por diversos tipos de interações, onde o aumento de temperatura local é o parâmetro que apresenta a mudança mais significativa. Efeito térmicos podem ser induzidos tanto por lasers pulsados quanto lasers CW. Absorção da radiação laser no tecido causa uma conversão de energia em calor, aumentando a temperatura do tecido. O aumento de temperatura depende de [13]:

- ◆ Características da radiação, tais como densidade de potência, comprimento de onda, duração de pulso e frequência de repetição de pulso;
- ◆ Características ópticas do tecido, tais como absorção e espalhamento;
- ◆ Característica térmica do tecido, tais como condutividade térmica, calor específico e condução de calor.

Contudo, dependendo da temperatura atingida no tecido em questão, diferentes efeitos podem ser alcançados, entre eles *coagulação*, *vaporização*, *carbonização*, e *derretimento* [3].

*Coagulação.* Neste processo a temperatura chega a, pelo menos, 60°C. Os tecidos coagulados aparecem significativamente mais escuros. A figura 3.9 mostra uma amostra de tecido uterino coagulado usando laser Nd:YAG CW [3].



Figura 3.9 Tecido uterino de um rato de laboratório branco com um laser Nd:YAG CW (potência:10W, bar:80 $\mu$ m) [3].

*Vaporização.* Consiste na absorção da radiação por moléculas de água, levando ao processo de vaporização. Devido a indução do aumento de pressão, a água tenta expandir seu volume por causa da vaporização, o que leva a microexplosões, como mostrado na figura 3.10 [3].

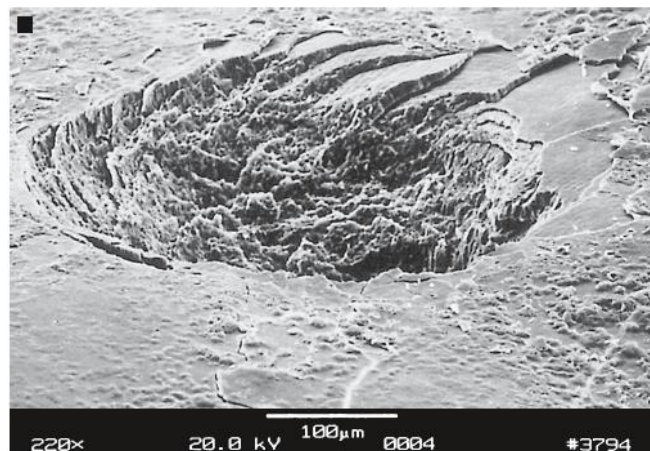


Figura 3.10 Dente humano vaporizado com 20 pulsos de laser Er:YAG (duração de pulso: 90 $\mu$ s, energia do pulso: 100mJ, taxa de repetição: 1Hz) [3].

*Carbonização.* Ocorre quando muita energia é aplicada. A temperatura do tecido irradiado é drasticamente elevada a temperaturas acima de 100°C. O tecido começa a liberar carbono (carbonizar), adquirindo uma coloração mais escura. Um

efeito similar a este é visto na figura 3.11. Para procedimentos médicos, a carbonização deve ser evitada um vez que diminui a visibilidade em cirurgias [3].

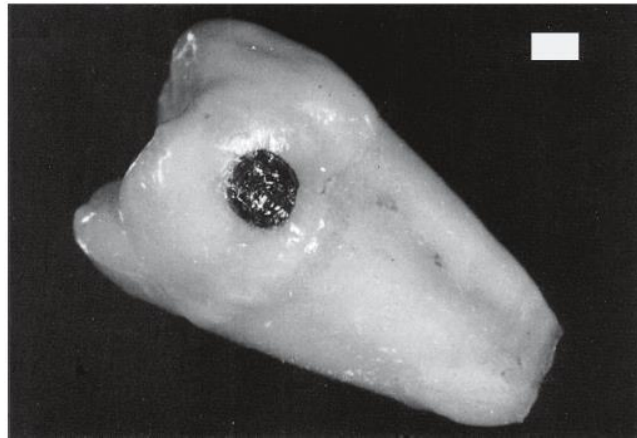


Figura 3.11 Dente humano carbonizado com um laser de CO<sub>2</sub> CW (potência: 1W, bar:1mm) [3].

*Derretimento.* A temperatura deve chegar a algumas centenas de graus celsius. Pode ser visto diversas rachaduras se espalhando na direção radial a partir da área irradiada. Após o resfriamento do derretimento pode ser visto bolhas de gás solidificadas, similar a uma lava solidificada [3].

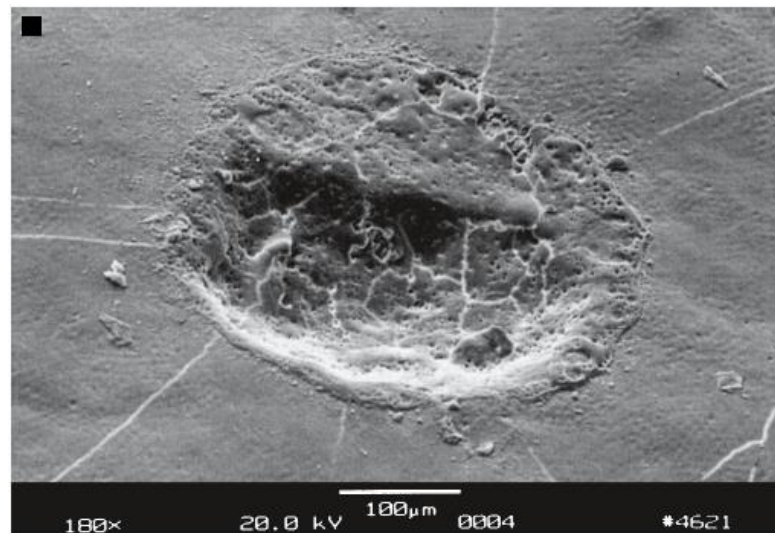


Figura 3.12 Dente humano derretido com 100 pulsos de um laser Ho:YAG (duração do pulso: 3,8μs, energia do pulso: 18mJ, taxa de repetição: 1Hz) [3].

Aumento da temperatura do tecido pode ser calculado por <sup>[10]</sup>.

$$T = \frac{Q}{c \times \rho \times V} = \frac{P \times t}{c \times \rho \times V} \quad (3.2.1)$$

Sendo:

T	Aumento da temperatura;
Q	Energia absorvida da radiação;
$\rho$	Densidade;
c	Capacidade do calor específico;
V	Volume irradiado;
P	Potência absorvida;
t	Tempo de exposição.

É válido discutir agora o efeito da temperatura do tecido, avaliar o que ocorre em cada faixa de temperatura e qual o efeito predominante. Assumindo que a temperatura corporal é de 37°C, nenhum efeito significativo pode ser medido nos próximos 5°C acima. O primeiro efeito a ser notado em uma faixa de temperatura de 42-50°C é a hipertermia <sup>[3]</sup>.

Além dos 50°C, há uma significativa redução da atividade enzimática, reduzindo a energia transferida para dentro do meio celular, imobilizando a célula. Consequentemente, alguns mecanismos de reparo da célula acabam sendo desativados <sup>[3]</sup>.

Em 60°C começa a desnaturação de proteínas e colágeno, levando a coagulação do tecido e necrose das células. Inumeros técnicas de tratamento tal como



termoterapia intersticial laser induzida (do inglês “*laser-induced interstitial thermotherapy (LITT)*”) tem como objetivo alcançar temperaturas logo acima de 60°C. Em temperaturas de 80°C a permeabilidade da membrana das células é drasticamente reduzida, destruindo ao invés de manter o equilíbrio das concentrações químicas [3].

Em 100°C, moléculas de água contidas na maioria dos tecidos começam a vaporizar. Essa ampla vaporização da água é vantajosa no sentido de carregar o excesso de calor gerado, evitando que a temperatura nos tecidos adjacentes seja elevada também. Em temperaturas acima de 100°C, a carbonização ocorre e pode-se observar o escurecimento dos tecidos adjacentes e a geração de fumaça [3].

Finalmente, além dos 300°C, o derretimento irá ocorrer, dependendo do material em questão [3].

Todos os passos estão resumidos na tabela 3.1, associando as temperaturas e os efeitos biológicos correspondentes [16].

Temperatura	Efeito Biológico
37°C	Normal
45°C	Hipertemia
50°C	Redução da atividade enzimática, imobilidade celular
60°C	Desnaturação de proteínas e colágeno, coagulação
80°C	Permeabilização de membranas
100°C	Vaporização
	Decomposição térmica (ablação)
>100°C	Carbonização
>300°C	Derretimento

Tabela 3.2 Efeitos térmicos da radiação laser [3].

Foi observado que a necrose do tecido não depende apenas da temperatura alcançada, mas também da duração temporal da temperatura, que é um importante

parâmetro para avaliar danos irreversíveis. A figura 3.3 ilustra a temperatura crítica e a correspondente duração temporal para se ter um dano irreversível. A curva foi feita a partir de observações empíricas. Nessa figura perceb-se que, para a temperatura de 60°C durante cerca de 6s irá conduzir a um dano irreversível. Áreas onde a temperatura ultrapassa os 60°C necrosam, servindo como coagulação do tecido. Áreas onde as temperaturas não ultrapassam estes mesmo 60°C ocorre hipertermia, porém a probabilidade da célula permanecer viva dependerá do tempo de irradiação [3].

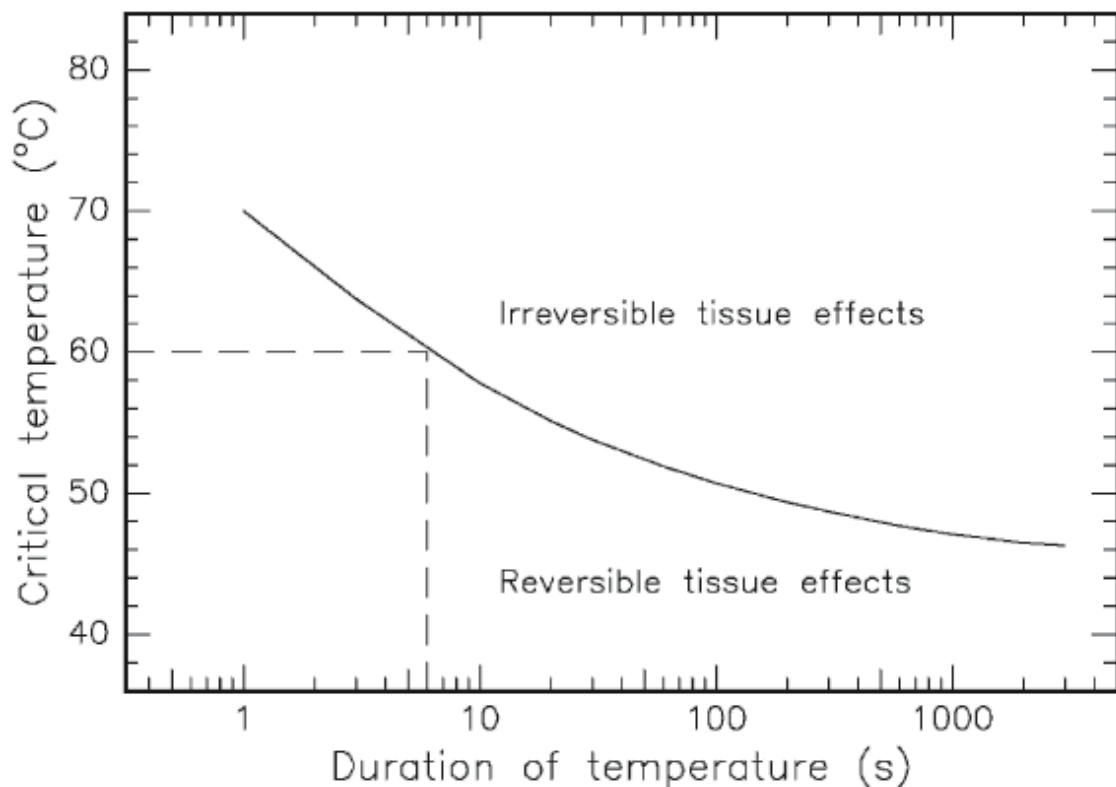


Tabela 3.3 Temperaturas críticas para a necrose celular. Dados de acordo com Henriques (1947) e Eicher e Seiler (1991) [3].

Laser age de modo térmico em densidade de energia  $\geq 10\text{W/cm}^2$  em lasers CW ou pulsados com durações de aproximadamente  $1\mu\text{s}$ . Lasers típicos para a finalidade de coagulação são Nd:YAG ou diodos. Já lasers de  $\text{CO}_2$  são adequados para vaporização e corte preciso de tecidos. Vale ressaltar que, carbonização e derretimento podem ocorrer com qualquer tipo de laser desde que tenha densidade de potências e tempo de exposição suficientes para tal [3].

Frequentemente várias tipos de efeitos térmicos são induzidos em uma exposição. A imagem 3.4 ilustra uma exposição onde há os efeitos comentados acima e as localizações dos mesmos em uma irradiação laser. Contudo, na maioria das aplicações médicas, o objetivo é alcançar somente um efeito, para isso é essencial uma cuidadosa avaliação dos parâmetros do laser [3].

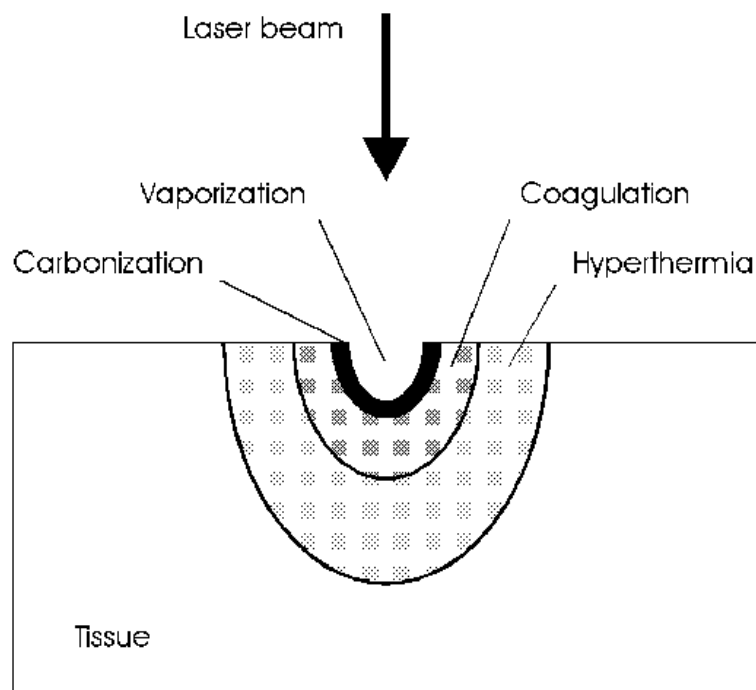


Tabela 3.4 Localização dos efeitos térmicos no tecido biológico [3].

Resumo sobre informações típicas de interações térmicas [3]:

◆ Lasers típicos:	CO <sub>2</sub> , Nd:YAG, Er:YAG, Ho: YAG, laser de argônio e laser diodo.
◆ Durações de pulsos típicos:	1µs ... 1min
◆ Densidades de potências típicas:	10 ... 10 <sup>6</sup> W/cm <sup>2</sup>
◆ Aplicações especiais:	Coagulação, vaporização, derretimento, decomposição térmica, tratamento de retina, termoterapia intersticial laser induzida.

### 3.2.3 FOTOABLAÇÃO

Fotoablação foi identificada inicialmente pelo nome de *photodecomposition ablativa*, significando que o material é decomposto quando exposto a uma intensidade de laser muito intensa. Os valores de parâmetros para esse tipo de interação ocorrer giram em torno de 10<sup>7</sup>-10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> em duração de pulso da ordem de nanossegundos [3].

Apenas fótons de lasers com emissão UV, tipicamente laser excímeros, conseguem uma energia suficiente a ponto de dissociar tais ligações. Por isso, os mecanismos de fotoablação são limitados apenas à aplicação da luz UV [3].

No processo de fotoablação, os fótons são absorvidos por elétrons, elevando-os de estados mais baixos energia de ligação a estados de energia mais altos. Quando um fóton de UV é absorvido, a energia ganha é geralmente alta o suficiente para que o elétron alcance um estado eletrônico que excede a energia de ligação, ionizando o átomo. Por conta disso, há a geração de estados excitados repulsivos, causando imediata dissociação do tecido. Isso causa uma expansão do volume irradiado e consequente ejeção do tecido da superfície (Figura 3.13) [3].

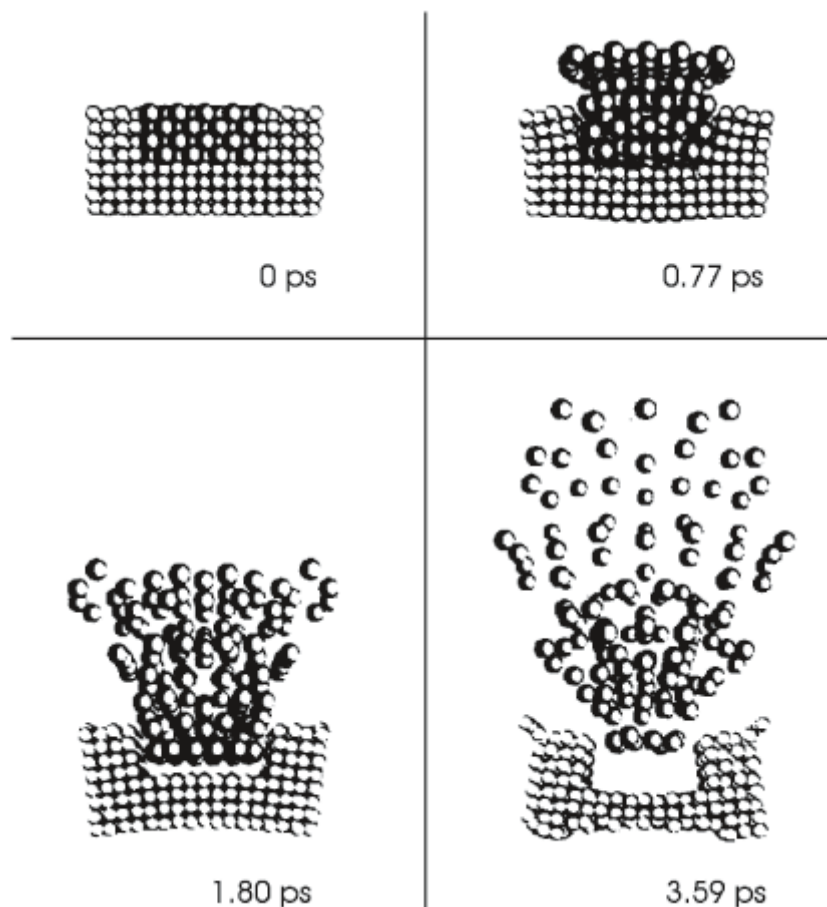


Figura 3.13 Simulação mostrando o movimentos dos monômeros de PMMA como função do tempo devido o processo de fotoablação. Reproduzido por Garrison e Srinivasan (1985) com a permissão do American Institute of Physics (1985) [3].

A principal vantagem da técnica de ablação é a precisão do processo como demonstrado na figura 3.5, com uma excelente previsibilidade e sem dar danos térmicos aos tecidos adjacentes (como pode se ver na figura 3.4, não há presença aparecimento de danos térmicos como coagulação ou vaporização). Hoje em dia a fotoablação é uma das técnicas mais bem sucedidas para cirurgia refrativa corneana, onde o poder refrativo da córnea é alterado na miopia, hipermetropia, ou astigmatismo

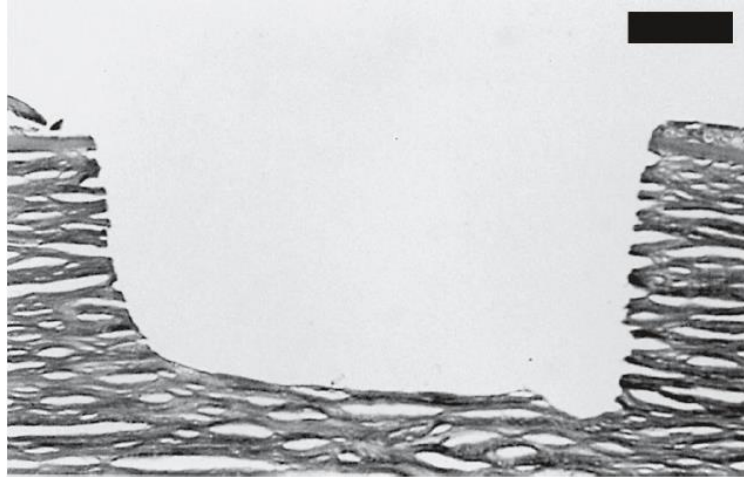


Tabela 3.5 Fotoablação de um tecido da córnea com um laser excímero de ArF (duração de pulso de 14ns, densidade de energia de 180mJ/cm<sup>2</sup>). Fotografia dada pelo Dr. Bende (Tübingen) [3].

Resumo sobre informações típicas de interações de fotoablação [3]:

◆ Lasers típicos:	Laser excímeros, exemplo: ArF, KrF, XeCl, XeF.
◆ Durações de pulsos típicos:	10 ... 100ns
◆ Densidades de potências típicas:	10 <sup>7</sup> ... 10 <sup>10</sup> W/cm <sup>2</sup>
◆ Aplicações especiais:	Cirurgia refrativa da córnea

### 3.2.4 COLAPSO ÓPTICO E ABLAÇÃO TECIDUAL

Quando densidades de potências excedem 10<sup>11</sup> W/cm<sup>2</sup> em sólidos ou fluidos, ou 10<sup>14</sup> no ar, um fenômeno chamado *colapso óptico* ocorre. Para se atingir o colapso óptico é necessário que a irradiação seja intensa o suficiente a ponto causar uma rápida ionização e sustentar energeticamente uma avalanche de elétrons, levando a uma acumulação de elétrons e íons livres. Um elétron livre absorve um fóton e se acelera. Estes elétrons acelerados colidem com um átomo e o ionizam, resultando em dois elétrons livres. Novamente estes dois elétrons livres podem absorver mais fótons, acelerar-se, ionizar novos átomos e assim por diante. Esse fenômeno de

absorção de fótons e consequente aceleração de elétrons é chamado de *Bremsstrahlung reverso* [3]. Entre as consequências que acompanham o colapso óptico, estão os seguintes efeitos [13].:

- ◆ Formação de plasma;
- ◆ Ondas de choque;
- ◆ Bolhas de cavitação,
- ◆ Formação de jatos.

A formação de plasma contribui, especialmente, para o mecanismo de interação por *ablação induzida por plasma*. Já os demais efeitos contribuem para o mecanismo de interação por *fotodisrupção* (mais adiante será visto que a interação por fotodisrupção apresentará também um pouco de formação de plasma). No seguintes pontos deste subcapítulo, cada efeito será abordado mais a fundo, por hora o objetivo é deixar claro quais são os efeitos que estão associados com cada mecanismo de interação [13]. A figura 3.14 mostra esquematicamente como estes mecanismos de interação e os efeitos estão relacionados entre si [3].

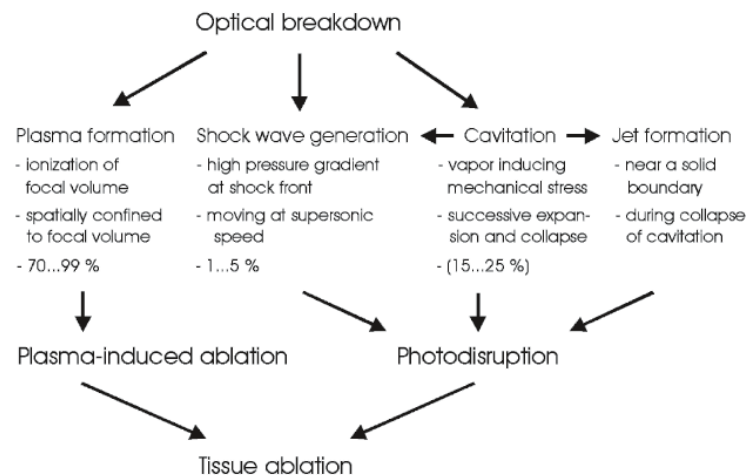


Figura 3.14 Esquema associando os processos físicos ao colapso óptico. As percentagens estão em valores estimados da energia transferida para cada efeito (energia pulsada incidente: 100%). A cavitação ocorre apenas em tecidos moles ou fluidos. Em fluidos, parte da energia da cavitação pode ser convertida para a formação de jatos [3].

Vale ressaltar que estes efeitos dependem fortemente dos parâmetros dos lasers. Antigamente, quando não haviam lasers com pulsos de picosegundos e nanossegundos, o plasma gerado era sempre acompanhado de efeitos de fotodisrupção (efeitos mecânicos tais como geração de ondas de choque, formação de bolhas de cavitação, e formação de jatos). Tais efeitos adicionais foram muito úteis em alguns tratamentos como litotripsia, que é o tratamento de cálculos, visando a “trituração” destes cálculos de modo a permitir que os mesmos fossem eventualmente expelidos do corpo pelas vias adequadas. Porém para fins ablativos, que exigem precisão, não era muito adequado ter estes efeitos, pelo fato de seus danos se espalharem, abrangendo uma área grande. Porém com a invenção de lasers com pulsos de pico e femtosegundos, plasmas puderam ser gerados de modo a minimizar os efeitos fotodisruptivos (ondas de choque, bolhas de cavitação e formação de jatos) [3].

A ablação induzida por plasma não é observada em pulsos de nanossegundos, justamente pelo fato do limiar de densidade de energia de colapso óptico nestes pulsos ser maior do que para pulsos de picosegundos (vide Figura 3.15). Por isso, para pulsos de nanossegundos, o colapso óptico é sempre associado com a formação de ondas de choque (efeitos disruptivos) [3].

Na faixa de pulsos de picosegundos e femtosegundos há a geração de picos com intensidades mais altas, mesmo com pulsos de energias consideravelmente mais baixos. Com estes pulsos extremamente curtos, o colapso óptico é alcançado com redução significativa de efeitos disruptivos [3].



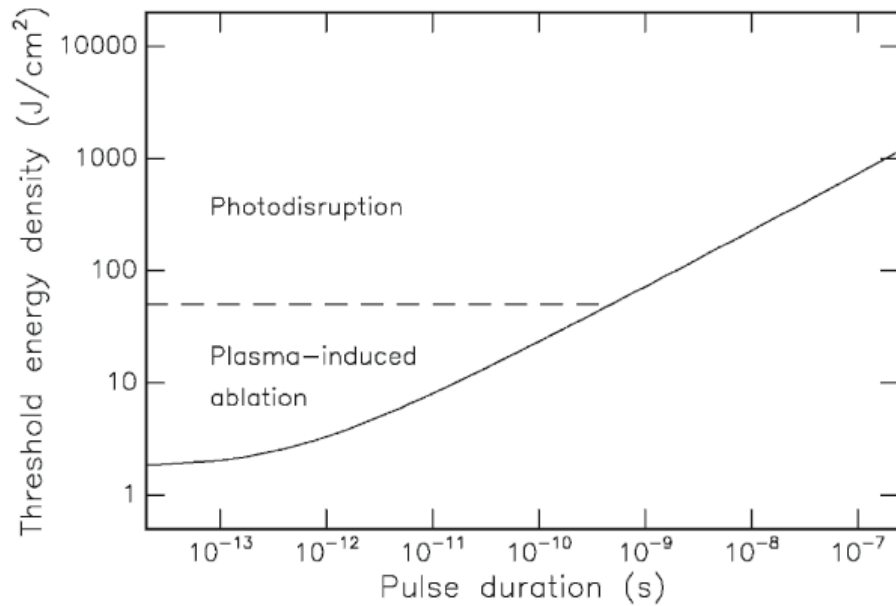


Figura 3.15 Distinção de ablação induzida por plasma e fotodisrupção de acordo com a densidade de energia aplicada [3].

Ambos mecanismos de interação, ablação induzida por plasma e fotodisrupção, estão ligados com a geração de plasma. Uma das grandes diferenças entre ambos os processos está no fato da ablação induzida por plasma estar espacialmente confinada na região de colapso, enquanto a fotodisrupção propaga para tecidos adjacentes. Nos próximos pontos serão abordadas algumas características mais particulares de cada mecanismo de interação [3].

#### 3.2.4.1 Ablação induzida por plasma

A ablação induzida por plasma é uma remoção limpa e bem definida de tecido, isto é, sem evidências de danos térmicos ou mecânicos *quando escolhido os parâmetros corretos de laser* [3].

Uma das característica fundamentais da ablação induzida pelo plasma é o alto coeficiente de absorção do plasma. Consequentemente, isso permite uma maior deposição de energia no tecido absorvende. O plasma tem um coeficiente de absorção muito mais elevado do que qualquer outro tecido nas faixas de radiações UV, visível, e IR. Este aumento do coeficiente de absorção do plasma leva a um consequente aumento da eficiência de ablação [3].

Resumo sobre informações típicas de interações de ablação induzida por plasma [3].

◆ Lasers típicos:	Nd:YAG, Nd:YLF, Ti:Safira
◆ Durações de pulsos típicos:	100fs ... 500ps
◆ Densidades de potências típicas:	$10^{11} \dots 10^{13} \text{ W/cm}^2$
◆ Aplicações especiais:	Cirurgia refrativa da córnea, terapia com cáries.

#### 3.2.4.2 Fotodisrupção

Ambos mecanismos de interação, ablação induzida por plasma e fotodisrupção, estão ligados com a geração de plasma. Uma faz grandes diferenças entre ambos os processos está no fato da ablação induzida por plasma estar espacialmente confinada na região de colapso, enquanto a fotodisrupção propagar para tecidos adjacentes, como escrito anteriormente. A característica da fotodisrupção, basicamente, é a divisão de tecidos por forças mecânicas. Fotodisrupção tem se estabilizado como uma ferramenta de cirurgia de invasão mínima (do inglês “*minimally invasive surgery* “MIS”). Duas de suas mais importantes aplicações são a capsulotomia posterior do cristalino, rupturas ou cortes na cápsula posterior do cristalino, e litotripsia de cálculos urinários, fragmentação de cálculos renais [3].

O efeito físico associado com o *colapso óptico* é a *formação de plasma* e a *geração de ondas de choque*. Caso o colapso óptico ocorra dentro de tecidos moles ou fluidos, haverá também cavitação e *formação de jato* [3].

*Ondas de choque*. Como o plasma cresce rapidamente, uma onda de pressão viaja para fora, no tecido circundante. A magnitude da onda depende da pressão e, conseqüentemente, da temperatura do plasma, o que depende por sua vez. Para pulsos mais longos, quando a energia depositada é maior, as ondas de choque adquirem maior amplitude [13].

*Cavitação*. A cavitação induzida por lasers ocorre caso os plasmas sejam gerados dentro de tecidos moles ou fluidos. Por meio da alta temperatura do plasma, volume focal é vaporizado, fazendo um trabalho contra a pressão externa do meio envolvente, formando uma bolha. Dentro de um milésimo de segundo esta bolha colapsará, normalizando novamente sua temperatura e pressão para valores similares aos atingidos no colapso óptico, conduzindo novamente a um ricochete de uma bolha. Esta sequência é repetida algumas vezes até que toda energia seja dissipada e todos os gases estejam diluídos nos fluidos circundantes [3].

*Formação de jato*. A formação de jatos deve-se ao colapso de bolhas de cavitação, os quais se chocam com sólidos, causando danos severos no sólido. Os primeiros a investigar estes efeitos foram Lauterborn (1974) e Lauterborn e Bolle (1975) quando produziram bolhas de cavitação focando um laser pulsado Q-switched em um fluido. Quando as bolhas colapsam na vizinhança de um limite sólido, um jato de líquido de alta velocidade é produzido em direção à parede, causando um potencial dano à parede [3].

Estes três efeitos são efeitos fotodisruptivos e podem gerar danos para fora do ponto focal do feixe laser, quando houver formação de plasma. Os efeitos fotodisruptivos diminuem conforme a duração do pulso diminuir também [13]. Os quatro efeitos, formação de plasma, geração de ondas de choque, cavitação e formação de

jato, ocorrem em diferentes escalas de tempo. Essa relação com o tempo está esquematizada na figura (3.16). A formação de plasma inicia durante o pulso do laser e dura até alguns nanossegundos, que é o tempo necessário para que os elétrons livres sejam espalhados pelo meio ao redor. A onda de choque é associada com a expansão do plasma e, por isso, já começa com a formação do plasma. Contudo, a onda de choque propaga para o tecido adjacente e deixa o volume focal. Aproximadamente 30-50ns depois, isso tem desacelerado para uma onda acústica normal. Cavitação, finalmente, é um efeito macroscópico que começa pelos 50-150ns após o pulso do laser. Este atraso é causado pela duração do processo de vaporização do material. Geralmente, a bolha de cavitação tem várias oscilações de expansão e colapso dentro de um período de algumas centenas de microssegundos como mostrado na figura (3.16). Já que a pressão dentro da bolha aumenta durante o colapso, cada ricochete da bolha é acompanhado de uma onda de choque. Além do mais, cada colapso pode induzir formações de jatos se bolha se encontrar nas proximidades de um limite sólido [3].

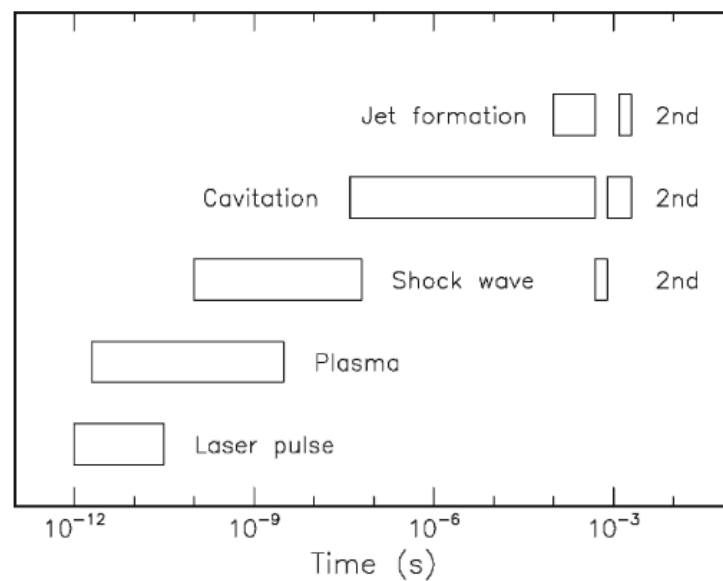


Figura 3.16 Escala de tempo aproximada de todos os processos que contribuem para a fotodisrupção. Assumido um laser com pulso de 30ps. Na imagem aparecem ainda a segunda ocorrência da formação de jatos, cavitação e ondas de choque [3].

Resumo sobre informações típicas de interações sobre fotodisrupção <sup>[3]</sup>:

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| ◆ Lasers típicos:                  | Lasers de estado sólido, por exemplo:<br>Nd:YAG, Nd:YLF, Ti:Safira |
| ◆ Durações de pulsos típicos:      | 100fs ... 100ns  |
| ◆ Densidades de potências típicas: | $10^{11} \dots 10^{13} \text{ W/cm}^2$                             |
| ◆ Aplicações especiais:            | Fragmentação do cristalino, litotripsia.                           |



### 3.3 PERIGOS PARA OS TECIDOS

Até agora foram tratados as principais interações da radiação óptica com a matéria. Nessa seção será abordado os perigos decorrentes do laser em relação aos tecidos humanos, os quais são separados em tecido ocular e pele.

#### 3.3.1 *PERIGOS DOS OLHOS*

Lesões oculares podem causar diversos danos em diferentes estruturas dos olhos. O grau de lesão depende, fundamentalmente, da quantidade de energia que o tecido absorve pelo volume. Um fator agravante ao olhos é o efeito de focagem inerente à córnea e à retina, o qual aumenta a irradiância e a exposição da radiação em até 100.000 vezes na retina <sup>[3]</sup>.

Em comprimentos de onda da região ultravioleta de 180nm a 315nm, a radiação é absorvida pela córnea, e responsável pela fotoqueratite. No ultravioleta próximo (UV-A), entre 315nm e 400nm, há a absorção da radiação pelo cristalino e contribui para a formação de catarata [3].

Radiações com comprimentos de onda na região visível e do infravermelho próximo, de 400nm a 780nm, são transmitidos pelo meio ocular com baixa perda de intensidade e são focados em uma área da retina com diâmetro de 10µm a 20µm. Por causa dessa focagem, a radiação laser na região de 400nm a 1400nm é denominada de *região de perigo para a retina* [3].

No espectro infravermelho distante (IR-C), com comprimentos de onda na região de 3µ a 1mm, há uma alta absorção da radiação pela superfície frontal do olho. Contudo a região infravermelha média (IR-B) e a infravermelha próxima (IR-A) apresentam penetração mais profunda, contribuindo ambas para catarata. A localização dos danos é sempre resultado da alta absorção de um determinado tecido em um determinado comprimento de onda [3].

### 3.3.2 PERIGOS DA PELE

As preocupação com os olhos sempre foram mais importantes em relação a pele. Contudo, entre outros motivos, o desenvolvimento de lasers tanto com emissão na faixa espectral ultravioleta quanto lasers de alta potência, exigiram uma preocupação maior com a pele [3].

Eritema, cânceres de pele e o aceleração do envelhecimento de pele são efeitos principais na faixa de comprimentos de onda de 230nm a 380nm (ultravioleta). Nesta faixa, os efeitos mais severos, como câncer de pele, ocorrem na região UV-B (280-315nm). Já na faixa de 280nm a 480nm com exposições crônicas há aumento na pigmentação da pele [3].

Na faixa final do ultravioleta (310-400nm) e na faixa visível (400-600nm) ocorrem reações fotossensíveis. Os efeitos mais significativos estão na faixa infravermelha (700-1000nm), onde ocorrem queimaduras e ressecamento excessivo de pele <sup>[3]</sup>.

## 4 CAPÍTULO – BASE DE REGULAMENTOS E REGRAS TÉCNICAS



O capítulo 4 foi baseado na estrutura do curso Laserschutzbeauftragten, sendo complementado na maioria dos casos com as informações contidas em cada documento, quando em caso, foi devidamente assinalado a fonte de onde as informações foram retiradas. Neste capítulo será apresentado a base de leis que estão em vigor na Alemanha para a proteção da radiação óptica artificial. Será nomeada cada lei com seu referente nome original (na língua alemã) e apresentado uma síntese da cada uma com o foco no objetivo pelo qual a lei foi criada. Como complemento, serão apresentadas algumas disposições gerais e conteúdos relevantes.





## 4.1 BASE DO REGULAMENTO JURÍDICO

De modo geral, o trabalho com radiação laser é controlado em pelas seguintes políticas, leis e regulamentos que serão abordados nos seguintes pontos de modo breve. A figura 4.1 apresenta a hierarquia destas leis <sup>[10]</sup>.

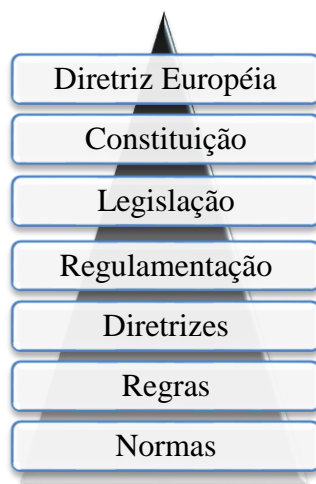


Figura 4.1 Hierarquia do conjunto de regras que regem a Alemanha.

### 4.1.1 DIRETRIZ EUROPÉIA

- ◆ Diretriz 2006/25 requisitos mínimos para proteger a saúde e a segurança de trabalhadores dos riscos dos agentes físicos (radiação óptica artificial).

*“Richtlinie 2006/25/EG Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) ”*

Objetivo: Este tratado prevê que o Conselho possa adotar, por meio desta diretriz requisitos mínimos com o objetivo de promover melhorias, especialmente no ambiente de trabalho, para garantir um melhor nível de proteção e segurança da

saúde dos trabalhadores, nomeadamente lesões provocadas nos olhos e pele, devidos aos agentes físicos (radiação óptica artificial).

A diretiz possui 16 artigos, entre eles encontra-se o estabelecimento dos limites de exposições (Expositionsgrenzwerte), abordados no artigo 3 onde os valores estão anexados ao anexo II da diretiz, obrigações dos empregados, artigo 4, as medidas destinadas a eliminar ou reduzir os riscos das exposições (Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Risiken), capítulo 5, a informações e formação dos trabalhadores (Unterrichtung und Unterweisung der Arbeitnehme), capítulo 6, entre outros <sup>[14]</sup>.

#### 4.1.2 LEGISLAÇÕES

◆ Leis de Proteção ao trabalhador.

*“Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)”*

Objetivo: A lei foi projetada para garantir e melhorar a segurança e a saúde dos trabalhadores no local de trabalho através de medidas de segurança. Ela se aplica a todas as áreas de atividade. A medidas de segurança de trabalho na acepção da lei são medidas para evitar ou prevenir acidentes para a saúde dos trabalhadores, isso inclui medidas de organização humana no trabalho.

Divido em 6 parágrafos, a lei aborda obrigações dos trabalhadores (Pflichten des Arbeitgebers), parágrafo 2, aborda os direitos e deveres dos trabalhadores (Pflichten und Rechte der Beschäftigten), no parágrafo 3, entre outros <sup>[15]</sup>.



## 4.2 REGRAS TÉCNICAS

Entre as regras técnicas, duas terão destaque neste trabalho por conta do conteúdo que ambas abrangem. São elas o “Regulamento de segurança do trabalho a radiações ópticas artificiais” (conhecida como OStrV) e “Regras técnicas para a regulamentação da proteção do trabalhador em relação a radiação óptica artificial” (conhecida como TROS). Ambas abordam os conteúdos fundamentais do presente trabalho, o que justifica a sua importância nesse capítulo.

### 4.2.1 REGULAMENTAÇÕES

- ◆ Portaria sobre segurança Industrial.

*“Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)”*

Objetivo: Esse regulamento é aplicável para a utilização dos equipamentos de trabalho. O objetivo do presente regulamento é garantir a segurança e a proteção da saúde dos trabalhadores quando se utiliza equipamentos de trabalho. Sendo estes pontos atingidos por (1) escolha de um equipamento adequado em conjunto com sua adequada utilização, (2) adequado uso de equipamentos conforme a concepção dos métodos de trabalho e de produção e também (3) a qualificação e treinamento dos funcionários. Abrange instalações que requeem supervisão bem como determina requisitos mínimos para a qualidade dos equipamentos na medida em que isso não esteja já coberto por outras leis <sup>[16]</sup>.

◆ **Regulamento de segurança do trabalho a radiações ópticas artificiais.**

***“Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV)”***

O regulamento é aplicável aos funcionários, entendidos como alunos, universitários e outras pessoas de instituições de formação que estão expostas em suas atividades à radiação óptica artificial. Estes estão sujeitos a riscos potenciais gerados por este tipo de radiação. O regulamento refere-se particularmente aos perigos para a pele e para os olhos.

O regulamento é dividido em cinco parágrafos, abrangendo assuntos desde avaliação de riscos, medidas e pessoas responsáveis, encontrados no parágrafo 2, limites de exposição para a radiação óptica artificial, parágrafo 3, ensino, encontrado no parágrafo 4, entre outros assuntos <sup>[17]</sup>.

Devido a sua grande importância neste trabalho, o regulamento foi traduzido e se encontra no anexo A.

◆ **Regras técnicas para a regulamentação da proteção do trabalhador em relação a radiação óptica artificial.**

***“Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS)”***

São regras técnicas para a segurança no trabalho em relação a radiação óptica artificial (radiação óptica incoerente) que dão ao nível tecnológico, a medicina do trabalho e à higiene ocupacional e a outros conhecimentos científicos sólidos, meios para a proteção dos trabalhadores a radiação óptica **incoerente** <sup>[18]</sup>.

O TROS é dividido em três partes, onde:

- Parte 1: Avaliação dos riscos decorrentes da radiação laser <sup>[19]</sup>;
- Parte 2: Medidas e determinações de exposições frente a radiação laser <sup>[20]</sup>;
- Parte 3: Medidas para proteção contra os perigos através da radiação laser <sup>[21]</sup>.

◆ Regulamento relativos à Saúde Ocupacional.

*“Verordnung zur Arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV)”*

O objetivo do regulamento é, por medidas de saúde ocupacional, reconhecer doenças relacionadas ao trabalho cedo e preveni-las. Isto é, o trabalho de cuidado a saúde no regulamentos deve ser feito para (1) fazer medidas preventivas de saúde ocupacional em operação, (2) avaliar as interações individuais do trabalho na pessoa de modo a determinar se caso a pessoa exercer uma certa atividade há um risco aumentado na saúde ou não, entre outros motivos.

O regulamento esclarece nos seguintes pontos as obrigações dos empregadores e médicos entre outros assuntos como pensões <sup>[22]</sup>.

◆ Regulação de materiais perigosos.

*“Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)”*

O objetivo desse regulamento é proteger as pessoas e o meio ambiente contra essas substâncias perigosas. O regulamendo trata de classificações, rotulagem, embalagens destas substâncias assim como medidas para proteger os trabalhadores e outras pessoas que se envolvam em atividades com tais substâncias <sup>[23]</sup>.

#### 4.2.2 ASSOCIAÇÕES PROFISSIONAIS

As associações profissionais (do alemão “*Berufsgenossenschaftliches Regelwerk*”) fornecem informações sobre regras e recomendações sobre a segurança e proteção à saúde. Juridicamente elas não são vinculadas, porém oferecem informações sobre o nível tecnológico <sup>[13]</sup>.

#### 4.2.3 REGRAS E INFORMAÇÕES DE ASSOCIAÇÕES PROFISSIONAIS

- ◆ Regras de proteção contra explosões.

*BGR 104, “Explosionsschutz-regeln”.*

Oferece uma base de regras de proteção contra explosões, contendo medidas de proteção, medidas organizacionais, entre outros. Uma coleção de regras técnicas relevantes para a proteção contra explosões. Tendo como objetivo a concretização da regulação para a segurança dos trabalhadores <sup>[24]</sup>.

- ◆ Emprego de proteção nos olhos e rosto.

*BGR 192, “Einsatz von Augen- und “,Gesichtsschutz”.*

Esta regra explica os regulamentos de prevenção de acidentes no que diz respeito ao uso de proteção no rosto e nos olhos. Abordando assunto quanto a aplicação da proteção e a caracterização dos óculos protetores <sup>[25]</sup>.

- ◆ Escolha e uso do óculos protetor contra laser e óculos ajustável.

*BGI 5092, “Auswahl und Benutzung von Laser-Schutz- und -Justierbrillen”.*

Essas informações descrevem os aspectos da seleção de óculos de segurança laser e de ajuste, que são usados para a proteção dos olhos contra os danos causados pela radiação laser, limitando áreas perigosas onde os óculos devem ser usados. O objetivo é dar assistência para o representante de proteção de laser e para o empresário na escolha do mais adequado óculos de proteção de laser <sup>[26]</sup>.

◆ Manipulação de guias de comunicação e fibra óptica.

*BGI 5031, “Umgang mit Lichtwellenleiter- Kommunikations- Systemen (LWKS)”.*

O objetivo é dar informações que dêem assistência para pessoas relacionadas com segurança de laser e empresários que lidam com fibra óptica. Esse documento trata sobre as avaliações de risco, medidas de proteção ao manusear o sistema de comunicação e fibra óptica, entre outros <sup>[27]</sup>.

◆ Produtos de laser com a finalidade de show ou projeções.

*BGI 5007, “Laser-Einrichtungen für Show- oder Projektionszwecke”.*

O objetivo é dar informações que dêem assistência a empresários e operadores de sistema de laser com o fim de cumprir as exigências de segurança para a operação do serviço <sup>[28]</sup>.

#### 4.2.4 NORMAS

◆ DIN EM 60825-1:2007

*DIN EM 60825-1:2007*

Objetivo: A norma define classificações dos aparelhos de laser em classes, especificando o quanto perigoso o aparelho é. A classificação é baseada no limites da radiação acessível (GZS). A classificação de acordo com essa norma deve ser **feita pelos fabricantes**. Esses limites são dependentes do comprimento de onda e do tempo de radiação <sup>[29]</sup>.



#### 4.3 INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Outros aspectos relacionados com a manipulação de lasers pode ser encontrada na comissão técnica DGUV.

- ◆ FA\_ET001 Regulamentação de saúde ocupacional para grávidas nos locais de trabalho sob ação de radiação laser.
- ◆ FA\_ET002 Nota sobre análise de riscos especiais em lentes ZNSE
- ◆ FA\_ET004 Rotulagem de óculos de segurança a laser que foram certificadas, dependendo da data de emissão de normas para proteção do laser.
- ◆ FA\_ET005 Operação de produtos laser para aplicações médicas e cosméticas
- ◆ FA\_ET006 Parecer do tópico radiação laser do Comitê técnico de Engenharia elétrica. Assunto: “Funções e estatuto do encarregado de segurança laser no serviço médico”



- ◆ FA\_ET007 Código de conduta quando se lida com construção de lasers <sup>[10]</sup>.

#### 4.3.1 *INFRAÇÕES*

No parágrafo 5, §11 do OStrV há os fatos que se não forem seguidos podem ser punidos como uma contravenção ou delito. Separados em infrações administrativas cometidas por negligências e infrações intencionais, considerado como crime. Entre as consequências por negligências, violando a segurança do trabalho, estão <sup>[10]</sup>:

- ◆ Constitui uma Infração penal
- ◆ Multa pela associação de profissionais ou pelo Conselho Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (Stafa), Inspeção do trabalho (GAA)
- ◆ Indenização do ferido, o recurso de aviso pela associação de profissionais.

## 5 CAPÍTULO – CLASSE DE LASER E VALORES LIMITES



A primeira parte do capítulo será abordada a divisão de lasers conforme a norma DIN EN 60825-1 de 2008, na qual há a divisão dos lasers em quatro classes e algumas subclasses. Na primeira seção haverá uma apresentação de cada categoria com referência em suas potências máximas de saída, perigos para os olhos e pele, entre outras características relevantes. Na segunda parte deste capítulo é abordado os limites de radiação acessíveis, os quais são baseados para fazer a classificação dos lasers, e os limites de radiação para os olhos e pele, definindo limites para que não haja qualquer tipo de dano aos tecidos biológicos.



## 5.1 CLASSES DE LASERS

A definição de classe de lasers é particularmente útil para a avaliação de risco. Os lasers foram divididos em classes para hierarquizar o perigo potencial da radiação laser que emitem, classificados em ordem de nível crescente, eles vão de classe 1 até a classe 4. O grau de periculosidade deles é mostrado de acordo com o esquema da figura 5.1.

O sistema de classificação de laser mudou várias vezes e por isso deve ser levado em consideração nas avaliações de riscos qual norma foi tomada como base. Um exemplo é a classe 3A, que desde 2004 não é mais utilizada nas classificações de lasers que usaremos neste trabalho. A classificação apresentada a seguir segue a norma DIN EN 60825-1:2007 e essa classificação do aparelho é feita pelo fabricante [10].

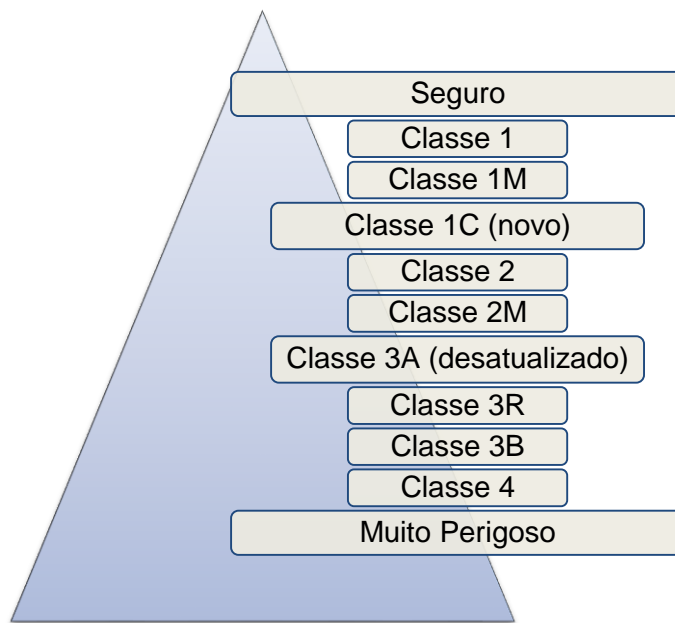


Figura 5.1 Nível de perigo em relação a classe de lasers de acordo com a norma DIN EN 60825-1:2007 [10].

### 5.1.1 LASER CLASSE 1

Nesta classe de laser a radiação laser acessível **não é perigosa** em condições razoavelmente previsíveis. Condições previsíveis são condições determinadas para o uso correto do laser, significando sua operação sendo feita de forma em que o laser é concebido e tecnicamente adequado. O equipamentos de laser da classe 1 são seguros mesmo com o uso de instrumentos ópticos como binóculos quando colocado na frente de seu feixe, pois não ultrapassam a exposição máxima permissível para a pele nem para os olhos <sup>[30]</sup>.

- ◆ Nota: A radiação emitida que se situa na faixa espectral visível e pode, por exemplo, causar cegeira, perturbação da visão em relação as cores, irritações e incomôdos que não devem ser desprezados. Na tabela 5.1 há alguns exemplos de limites de radiação acessíveis para cada comprimento de onda e intervalo de tempo de exposição<sup>[30]</sup>.

Vale lembrar que o laser classe 1 também inclui os chamados lasers de alta potência e outros lasers encapsulados de modo que nenhuma radiação laser potencialmente perigosa seja acessível durante a operação normal <sup>[30]</sup>.

Comprimento de onda $\lambda$	Tempo de exposição t	Limite de radiação acessível
270 nm	30000 s	30 W/m <sup>2</sup>
315 nm (UV)	30000 s	7,9 $\mu$ W
532 nm (VIS)	100 s	390 $\mu$ W
650 nm (VIS)	100 s	390 $\mu$ W
1064 nm (IR)	100 s	1560 $\mu$ W
10600 nm (IR)	100 s	1000 $\mu$ W

Tabela 5.1 Tabela sobre exemplos de limites de radiação acessível para a classe de laser 1 de diferentes comprimentos de onda contínua, calculados com  $\alpha \leq \alpha_{\min}$  utilizando a norma DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1):

2008-05 <sup>[10]</sup>.

A identificação do laser de classe 1 é localizada sobre o invólucro do dispositivo de laser (Figura 5.2).



Figura 5.2 Exemplo de identificação de laser de classe 1 <sup>[30]</sup>.

### 5.1.2 LASER CLASSE 1M

A radiação laser é acessível na faixa de comprimentos de onda de 302,5 nm a 4000 nm, isto é, na parte da região espectral na qual a maioria dos instrumentos ópticos usados são “transparentes” aos olhos. A radiação laser acessível do laser de classe 1M é tão baixa quanto ao laser de classe 1, porém ao contrário do laser de classe 1, o laser de classe 1M se torna perigoso quando há o emprego de instrumentos ópticos que diminuam a seção transversal do feixe, tais como telescópios ou binóculos. O “M” do nome significa “Magnifying optical viewing instruments”, em português, instrumentos ópticos de ampliação de visualização. Com o uso de instrumentos ópticos, os perigos podem ser comparados com lasers de classe 3R ou 3B. O laser classe 1M pode emitir potências que ultrapassam os limites da classe 1 (até 500 mW, limites para classe de laser 3R e 3B), porém se o feixe é dilatado ou muito divergente, os valores de radiação nos olhos podem chegar a valores abaixo dos limites de exposição para pele e olhos (EGW) <sup>[30]</sup>.

Os requisitos para um laser ser de classe 1M deve ser tal que a passagem da radiação pela pupila deve ficar abaixo do valor de radiação acessível da classe 1M para a classe 1 e a radiação total deve ficar abaixo do valor de radiação acessível para classe 3B <sup>[30]</sup>.

- ◆ Nota: Os equipamentos de laser da classe 1M, que emitem na faixa espectral visível, podem por exemplo causar cegeira, perturbação da visão em relação as cores, irritações e incomôdos que não devem ser excluídos <sup>[30]</sup>.

A identificação do laser de classe 1 é localizada sobre o invólucro do dispositivo de laser (vide Figura 5.3). No entanto, existe também a possibilidade de identificação com as informações do usuário <sup>[30]</sup>.



Figura 5.3 Exemplo de identificação de laser de classe 1M <sup>[30]</sup>.

### 5.1.3 LASER CLASSE 1C

Essa classe foi recentemente inserida. A classe 1C se refere a produtos para tratamento de pele (produtos médicos ou cosméticos) que são utilizado em contacto com a pele (C de 1C, representa contato). Contudo, em relação aos olhos nenhuma radiação da classe 1C está acessível <sup>[10]</sup>.

#### 5.1.4 LASER CLASSE 2

Em relação ao laser de classe 2 a radiação acessível situa-se na faixa espectral visível (400 nm a 700 nm). Já os componentes adicionais de radiação fora da faixa espectral de 400 nm a 700 nm satisfazem as mesmas condições para laser classe 1. Para laser de radiação contínua de classe 2, os **limites de radiação acessível são  $P = 1 \text{ mW}$**  (em  $C_E = 1$ )<sup>[30]</sup>.

- ◆ Nota: Para aparelhos de laser classe 2 em exposições acidentais nos olhos, isto é, tempos menores que 0,25 s, não há perigos. Por isso, podem ser utilizados sem quaisquer outras medidas de proteção, desde que seja assegurado que nenhuma ação intencional de olhar para o laser em períodos prolongados de 0,25s nem repetidamente seja feita, incluído radiação laser refletida a fim de especulação. Um olhar proposital no feixe desta classe de laser pode ser perigosa.

Os aparelhos de laser classe 2 podem, especialmente com a diminuição da luz ambiente, causar irritação ocular devido ao raio laser, ceceira temporária, ofuscamento, e causar “*afterimages*” prolongados. Através dessas consequências indiretas podem mais ou menos graves, particularmente importante quando as atividades dependem de uma visão perfeita, tais como, quando se trabalha com máquinas ou dirigindo veículos ou aeronaves<sup>[30]</sup>.

Segue abaixo, na figura 5.4 o modelo de identificação do laser para esta classe.

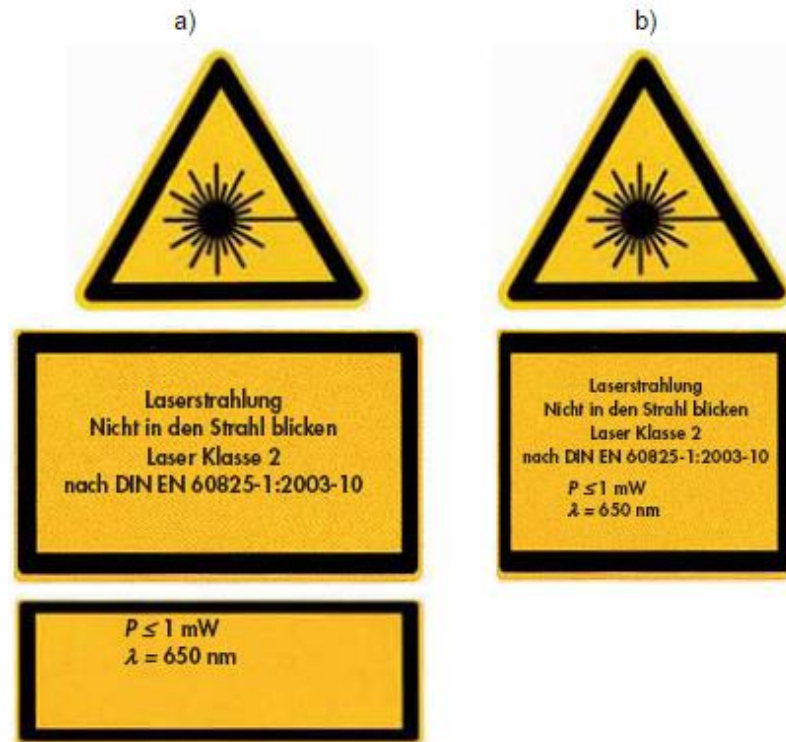


Figura 5.4 Exemplo de identificação de laser de classe 1M, podendo ser uma ou outra <sup>[30]</sup>.

### 5.1.5 LASER CLASSE 2M

A radiação acessível situa-se na faixa espectral visível (400 nm a 700 nm). Quanto aos componentes adicionais da radiação fora a faixa de comprimento de onda de 400 nm a 700 nm, eles preenchem as condições para laser classe 1M. Os produtos de laser de classe 2M consistem um comparável perigo com produtos de laser de classe 2, a menos em caso de emprego de instrumentos ópticos, quando os riscos podem ser comparados com os dos lasers de classe 3R e 3B. A condição para que o laser seja de classe 2M é tal que quando o feixe de laser 2M passa pela pupila ele deve ter valores abaixo do valor de radiação acessível para classe 2 e a radiação total deve cair abaixo da do valor de radiação acessível para lasers da classe 3B <sup>[30]</sup>.



- ◆ Nota: Em exposição de curto intervalo de tempo (até 0,25 s) as exposições a olho nú também não são perigosas como no caso de laser de classe 2, porém nessa classe não pode haver nenhum instrumento óptico entre o feixe e os olhos, telescópio ou lupa de modo a reduzir o feixe do laser [30].

Os aparelhos de laser classe 2 podem, especialmente com a diminuição da luz ambiente, causar irritação ocular devido ao raio laser, cegueira temporária, ofuscamento, causar "*afterimages*" prolongados. Através dessas consequências indiretas podem mais ou menos graves, particularmente importante quando as atividades dependem de uma visão perfeita, tais como, quando se trabalha com máquinas ou dirigindo veículos ou aeronaves [30].

Segue a abaixo, na figura 5.4 o modelo de identificação do laser para esta classe.



Figura 5.5 Exemplo de identificação de laser de classe 2M [30].

### 5.1.6 LASER CLASSE 3A (APLICADO ATÉ MARÇO DE 1997)

Classificado pela norma DIN EM 60825-1 até março de 1997, hoje em dia não é mais comumente usada essa classificação de laser. Hoje aparelhos de laser classe 3A que emitem comprimento de onda na **faixa visível**, podem ser manipulados como lasers de **classe 2M** e dispositivos de classe 3A que emitem radiação no espectro **não-visível** podem ser tratados como lasers de **classe 1M** <sup>[30]</sup>.

- ◆ Nota: Considerando o grau de periculosidade, e em caso de nenhum instrumento óptico ser usado, de modo a diminuir a secção transversão do feixe. Os aparelhos de laser de classe 3A, que emitem apenas na faixa espectral visível, podem ter seus perigos comparados com aparelhos de laser classe 2. Aparelhos de laser classe 3A, que emitem na faixa espectral não-visível, consistem um perigos comparável com aparelhos de laser de classe 1 <sup>[30]</sup>.

Nos aparelhos de laser classe 3A especialmente com baixa luz ambiente, o olhar para o laser pode causar irritação ocular, cegueira temporária, ofuscamento e causar “*afterimages*” prolongados. Através destas consequências, o efeitos podem mais ou menos graves, levando em conta atividades dependem de uma visão perfeita, tais como, pessoas que trabalham dirigindo máquinas, veículos ou aeronaves <sup>[30]</sup>.

### 5.1.7 LASER CLASSE 3R

Aparelhos de laser de classe 3R tem sua radiação acessível no comprimento de onda de 302,5nm a 10<sup>6</sup>nm e ela é potencialmente perigosa para os olhos sob

quaisquer exposições. Deve-se, neste caso, por meios de medidas de proteção, tornar essa exposição tão difícil quanto possível [30].

A potência do laser, por exemplo, é um máximo de 5 vezes o limite de radiação acessível da classe 2 na faixa de comprimento de onda de 400 nm a 700 nm e de 5 vezes o limite de classe 1 para outros comprimentos de ondas. Para emissão contínua de laser classe 3R o **limite da radiação acessível** de laser de **classe 3R é  $P = 5\text{mW}$**  (com  $C_E=1$ ) na faixa de comprimento de onda de 400 nm a 700 nm. Para empresas operarem com lasers a partir da classe 3R, precisam da **nomeação de um responsável** pela proteção de laser [30].

- ◆ Nota: Os aparelhos de laser classe 2 podem, especialmente com a diminuição da luz ambiente, causar irritação ocular devido ao raio laser, cegeira temporária, ofuscamento e causar “*afterimages*” prolongados. Através dessas consequências indiretas podem mais ou menos graves, particularmente importante quando as atividades dependem de uma visão perfeita, tais como, quando se trabalha com máquinas ou dirigindo veículos ou aeronaves [30].

A figura 5.6 mostra exemplos de identificação de placas de sinalização. A placa (a) para comprimentos de onda de 400nm a 700 nm, a placa (b) para comprimentos de onda menores que 400nm, radiação não-visível e a placa (c) para comprimentos de onda de 700nm a 1400nm, radiação não-visível [30].

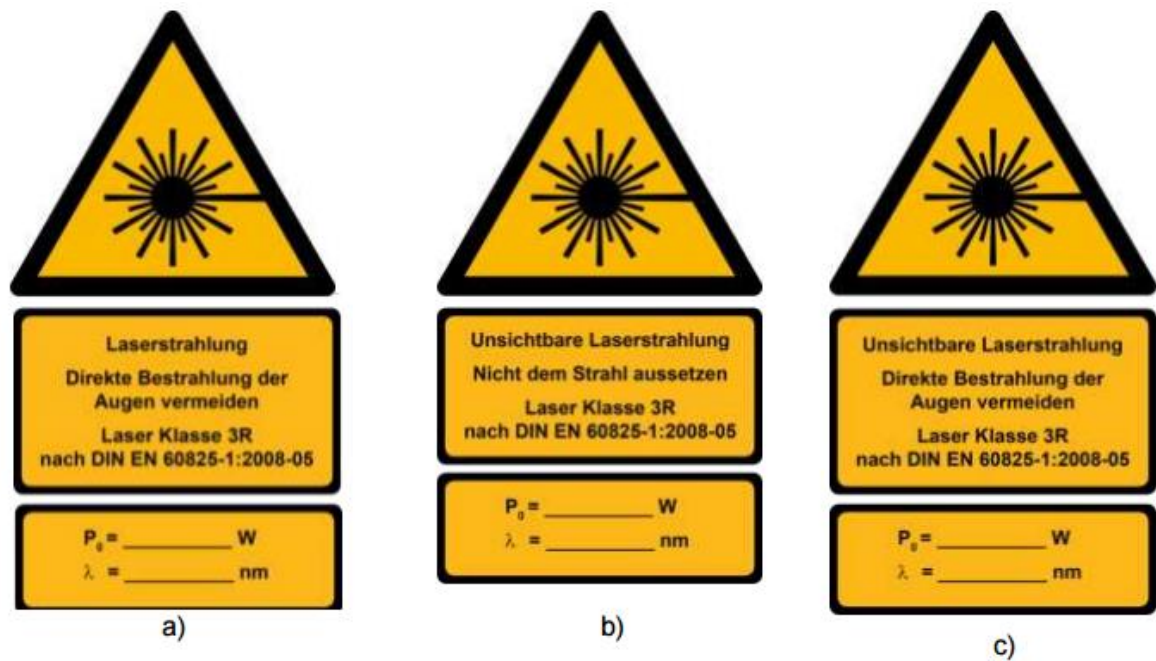


Figura 5.6 Exemplo de identificação de laser de classe 3R de acordo com intervalo de comprimentos de onda que a placa abrange [30].

### 5.1.8 LASER CLASSE 3B

Com aparelhos de laser classe 3B o feixe de laser pode provocar incêndio em materiais inflamáveis. Os valores limites de **radiação acessível** para essa classe de **laser 3B é de  $P=500\text{mW}$**  (com  $C_E=1$ ) na faixa visível no modo contínuo. O uso de aparelhos desta classe de laser requer a **nomeação de um responsável** pela proteção de laser [30].

- ◆ Nota: Nesta classe a radiação laser acessível é perigosa para os olhos e comumente para a pele. Uma visão direta no feixe de laser de classe 3B é perigosa, mesmo ocorrendo por curto período de tempo e se deve, como nos lasers 3A, tornar a exposição tão difícil quanto possível. Aparelhos desta classe podem ultrapassados os limites de exposição

para a pele, consistindo em possíveis danos para a mesma. Isso ocorre quando, o diâmetro do feixe é muito pequeno ou muito focado [30].

Um feixe de laser de uma aparelho de laser classe 3B pode teoricamente ser seguro caso o feixe passe por um refletor difuso, porém apenas se as seguintes condições forem atendidas simultaneamente: (1) que a distância entre o refletor difuso e a córnea do olho seja de, pelo menos, 13 centímetros, (2) que o tempo de observação máxima não ultrapasse 10s e (3) que as componentes não sejam redirigidas para os olhos [30].

A figura 5.7 mostra dois exemplos de identificação para lasers desta classe. O exemplo (a) se aplica para emissões na faixa espectral visível e o exemplo (b) para emissões na faixa espectral não-visível [30].

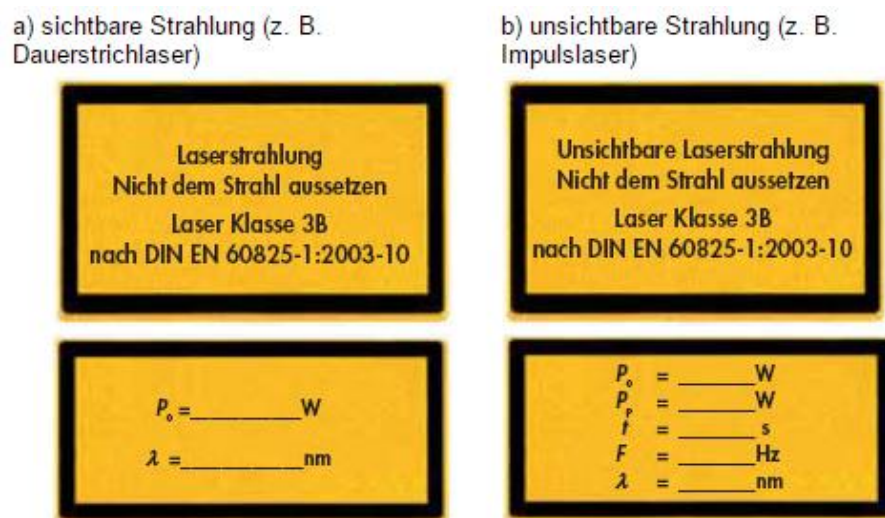


Figura 5.7 Exemplo de identificação de laser de classe 3B para laser que emite radiação na faixa espectral visível (a) e a faixa espectral não-visível (b) [30].

### 5.1.9 LASER CLASSE 4

Laser de classe 4 são aparelhos cuja potência de saída, por exemplo, tenha energias que excedam os limites de radiação acessível para classe 3B. Os lasers de classe 4 são considerados laser de alta potência, sendo aqueles que ultrapassam os valores de radiação acessível para classe 3B. O uso de aparelhos desta classe de laser requer a **nomeação de um responsável** pela proteção de laser <sup>[30]</sup>.

- ◆ Nota: A radiação laser acessível é muito perigosa tanto para os olhos como para a pele, porém nessa classe, diferentemente da classe anterior, mesmo a radiação difusa pode ser perigosa. Em aparelhos de laser classe 4, a radiação laser pode causar incêndio e perigo de explosões <sup>[30]</sup>.

A radiação laser do aparelho de laser de classe 4 é muito forte, calcula-se que qualquer tipo de exposição dos olhos ou da pele cause danos. Além disso, deve-se sempre verificar se foi tomada todas medidas suficientes para a proteção antes de qualquer uso de aparelhos de laser de classe 4 <sup>[30]</sup>.

A figura 5.8 mostra dois exemplos de identificação para lasers desta classe. O exemplo (a) se aplica para emissões na faixa espectral visível e o exemplo (b) para emissões na faixa espectral não-visível <sup>[30]</sup>

a) sichtbare Laserstrahlung (z. B. Dauerstrichlaser)

b) unsichtbare Laserstrahlung (z. B. Impulslaser)

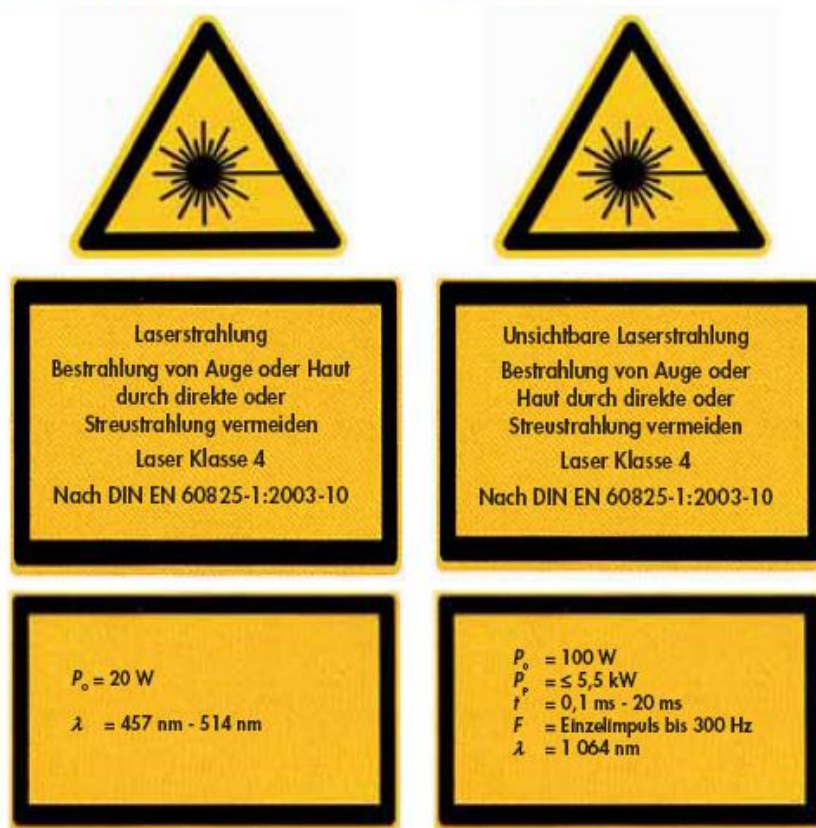


Figura 5.8 Exemplo de identificação de laser de classe 3B em relação feixa espectral de emissão de radiação, na qual a placa (a) se refere a emissões na faixa espectral visível e a (b) a faixa espectral não-visível [30].



## 5.2 VALORES LIMITES

### 5.2.1 LIMITES DE RADIAÇÃO ACESSÍVEL

O limite de radiação acessível (GZS, acrônimo usado na língua alemã para “*Grenzwert der zugänglichen Strahlung*”) é o valor máximo da radiação a qual está

acessível na parte exterior do aparelho laser, em conformidade com a norma DIN EN 60825 <sup>[10]</sup>.

Este limite é usado para classificação dos aparelhos de laser em classes, especificando o quanto ele pode ser perigoso aos olhos e pele. A classificação apresentada no primeiro ponto deste capítulo está de acordo com a norma DIN EN 60825-1:2007 e é **executada pelo fabricante** a classificação. Estes limites são dependentes do comprimento de onda e do tempo de irradiação que o aparelho laser emite <sup>[10]</sup>. A classificação se baseia em três aspectos <sup>[30]</sup>:

- ◆ O limite de radiação acessível para cada laser;
- ◆ Os requisitos de medição em relação à distância, ao diâmetro de abertura e limite do ângulo de espalhamento do feixe, os quais devem refletir as diferentes condições de irradiações. As medições são feitas para um dado aparelho laser e sua radiação acessível será comparada com o GZS para determinar a classe de laser.
- ◆ As condições de teste nas quais os valores de GZS e radiação acessível são determinados devem incluir uma previsível de operação incorreta. Além disso é feita uma distinção entre a operação normal, manutenção e serviço. O uso de acessórios e diferentes configurações do dispositivo, que pode ser produzido sem utilização de ferramentas deve ser levada em consideração.

### 5.2.2 LIMITES DE EXPOSIÇÃO PARA OLHOS E PELE

Os valores limites de exposição (EGW, acrônimo para a palavra alemã “*Expositionsgrenzwert*”) são limites relativos da exposição à radiações ópticas que estão diretamente ligados aos efeitos na saúde baseados em considerações biológicas <sup>[14]</sup>. Em outras palavras, são limites nos quais as pessoas podem ser expostas sob circunstâncias normais, sem a ocorrência de consequências prejudiciais



à saúde. Estes valores levam em conta qualquer efeito que possa ocorrer tanto a curto quanto a longo prazo devido ao contato da radiação com o tecido biológico. Entre os fatores para a determinação dos limites de exposição, estão o comprimento de onda, do tempo de exposição e em parte da ângulo de divergência da fonte. Isto é especificado em  $W/m^2$  (irradiância E) ou em  $J/m^2$  (irradiação H), mostrado de modo simplificado na tabela 5.2. Nos próximos pontos serão abordados fatores de correções para a determinação dos limites de exposição <sup>[10]</sup>.

Vale lembrar que em alguns trabalhos (por exemplo a norma EM 60825) os valores limites de exposição são referidos como radiação máxima admissível (Maximal Zulässige Bestrahlung, MZB) <sup>[10]</sup>.

Gama de comprimento de onda (nm)	Irradiância E				Radiação H			
	D*		M**		M		I***, R****	
	Duração de pulso (s)	$W/m^2$	Duração de pulso (s)	$W/m^2$	Duração de pulso (s)	$W/m^2$	Duração de pulso (s)	$W/m^2$
100 até 315	30.000	0,001	$< 10^{-9}$	$3 \times 10^{10}$	-	-	$> 10^{-9}$ até $3 \times 10^4$	30
> 315 até 1400	$> 5 \times 10^4$ até 10	10	-	-	$< 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$> 10^{-9}$ até $5 \times 10^4$	0,005
> 1.400 até $10^6$	$> 0,1$ até 10	1.000	$< 10^{-9}$	$10^{11}$	-	-	$> 10^{-9}$ até 0,1	100

Tabela 5.2 Tabela simplificada dos limites de exposição. Onde \* onda contínua (potência constante em pelo menos 0,25s), \*\* mode-locked (emissão em pulsos, sendo menores que  $10^{-7}s$  e maiores que 1ns), \*\*\* pulso (emissões que sejam  $<$  que 0,25s e maiores que  $10^{-7}s$ ) e \*\*\*\* pulso gigante (emissões em pulso, menores que  $10^{-7}s$  e maiores que 1ns) <sup>[26]</sup>.

### 5.2.2.1 Duração de exposições relevantes

O tempo de exposição depende muito da área de aplicação laser. Na tabela 5.3 abaixo estão tempos de exposição relevantes, são valores típicos que determinam as condições de exposições em certas aplicações do laser, estes tempos são utilizados, de certo modo, pelo fabricante na hora da classificação do laser [20].

Tempo de Exposição	Aplicações
0,25 s	por breve tempo, considerado um olhar por acaso no feixe de laser visível de um laser portátil, dirigido ou outros tipos de lasers;
2 s	típico para olhar consciente de empregados treinados em feixes de laser de classe 2 durante o ajuste de laser fixo;
5 s	foi tipicamente marcada para a variedade de óculos de proteção laser e filtros, os filtros estando de acordo com a norma da data de emissão de 2010/2012.
10 s	foi tipicamente marcada para a variedade de óculos de proteção laser e filtros, os filtros que estava de acordo com a norma válida até 2010.
100 s	tipicamente maior para radiação laser com comprimento de onda de maior que 400 nm
30.000 s (≈8h)	tipicamente radiação laser com olhar intencionalmente na direção da fonte por períodos de tempo maiores que 100 s

Tabela 5.3 Duração de exposições em diferentes aplicações laser [20].

### 5.2.2.2 Radiação com diversos comprimentos de onda

Radiação laser é usada em algumas aplicações diferentes comprimentos de onda, nesse caso cada comprimento de onda precisa ser analisado individualmente para ver se os limites de exposição não estão sendo ultrapassados para cada um deles. Além disso, neste caso deve-se relevar a aditividade dos efeitos de diferentes comprimentos de onda. Por exemplo, uma radiação no comprimento de onda UV-A contribui, para como a radiação IR-A, para a formação de catarata. Outro exemplo é o efeito da radiação visível (400nm – 700nm) e da radiação IR-A (700 – 1400nm) que

em ambos os casos ocorre efeito térmico na retina, consequentemente os efeitos se somam neste caso. A tabela 5.4 mostra os efeitos para olhos e pele de acordo com os comprimentos de onda dos lasers <sup>[20]</sup>.

Faixa Espectral	100nm - 315 nm	315nm - 400nm	400nm - 1400nm	1400nm - 10 <sup>6</sup> nm
100nm - 315 nm	Olhos e Pele			
315nm - 400nm		Olhos e Pele	Pele	Olhos e Pele
400nm - 1400nm		Pele	Olhos e Pele	Pele
1400nm - 10 <sup>6</sup> nm		Olhos e Pele	Pele	Olhos e Pele

Tabela 5.4 Tabela sobre os efeitos aditivos da radiação para olhos e pele em diferentes intervalos do espectro <sup>[20]</sup>.

O efeito aditivo de diferentes comprimentos de onda  $i$  é a soma da razão entre irradiância  $E_i$  e o valor do limites de exposição para todos os comprimentos de onda integrantes do feixe. O limite para que o feixe esteja dentro dos limites aceitáveis é que a soma dessas razões seja inferior a 1. Segue a equação <sup>[20]</sup>:

$$\sum_{\lambda_i} \frac{E_i}{E_{EGW_i}} \leq 1 \quad (5.2.1)$$

Sendo

$\lambda_i$  comprimento de onda  $i$ ;

$E_i$  exposição (irradiância) para o comprimento de onda  $i$ ; e

$E_{EGW_i}$  Limites de exposição para o comprimento de onda  $i$ .

### 5.2.2.3 Determinação do fator de correção $C_E$

Olhando para a radiação quase paralela (olhar direto para o raio laser), surge na retina um diâmetro mínimo local de cerca de  $25\mu\text{m}$ . Os valores de exposição se referem sempre ao pior dos casos. No caso de olhar para um fonte, os limites de exposição são aumentados por um fator de correção de  $C_E$ . Isso leva em conta ampliação da imagem sobre a retina, em outras palavras, o tamanho da “mancha” do feixe de laser na retina, que é determinada pela expansão do ângulo  $\alpha$  que aparece na fonte <sup>[10]</sup>.

Podemos determinar esse ângulo  $\alpha$  pelo tamanho da imagem produzida por um feixe de luz, por exemplo, um reflexão difusa sobre a retina é determinada pela medida do ângulo alpha  $\alpha$ . Para pequenos ângulos vale, aproximadamente, a relação (5.2.2) <sup>[10]</sup>.

$$\alpha = \frac{d_Q}{r} \quad (5.2.2)$$

Sendo:

$d_Q$  é o diâmetro do feixe da fonte visível; e

$r$  é a distância da fonte ao olho.

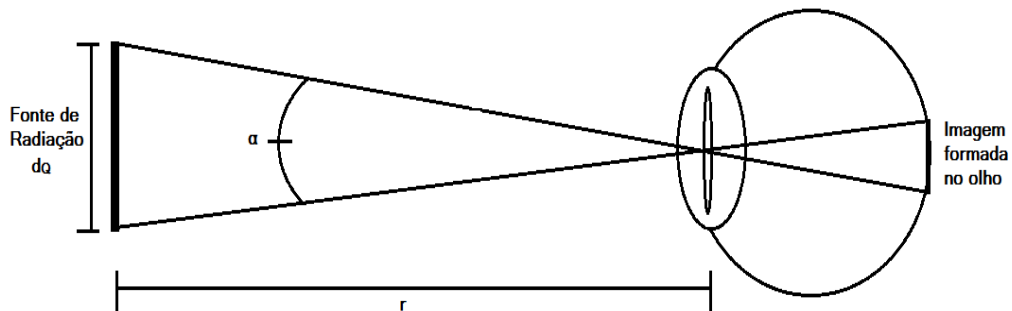


Figura 5.9 Figura identificando os parâmetros para a determinação da extensão angular  $\alpha$  de uma fonte de radiação artificial.

Cada olhar para um feixe colimado de laser tendo uma extensão angular inferior a  $\alpha_{\min} = 1,5 \text{ mrad}$  é referido como um “olhar direto” ou “olhar a uma fonte pontual”. O valor máximo de  $\alpha_{\max} = 100 \text{ rad}$ . Os demais valores entre o máximo e o mínimo são calculados de acordo com a tabela D.8 do anexo D [10].

### 5.2.3 EXEMPLOS DE DETERMINAÇÃO DE ALGUNS LIMITES DE EXPOSIÇÃO

Todos os exemplos foram retirados do livro do curso “Laserschutzbeauftragte”

#### ◆ Exemplo 1:

Determine o limite de exposição (em  $\text{J/m}^2$ ) com uma irradiação de olho com laser na faixa espectral vermelha ( $\lambda = 663 \text{ nm}$ ) e uma duração de 5 s (olhar direto,  $C_E = 1$ )<sup>[c]</sup>.

*Fórmulas:*  $H_{\text{egw}} = E_{\text{egw}} \cdot t$ .

$$H_{\text{egw}} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2}$$

*Resolução:*

A partir da tabela D.4 do anexo D, pode-se encontrar para a exposição  $H_{\text{egw}}$ :

$$H_{\text{egw}} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2} = 18 \cdot 0,5^{0,75} \text{ Jm}^{-2} = 18 \cdot 0,59 \text{ Jm}^{-2} = \mathbf{10,6 \text{ Jm}^{-2}}$$

Com isso, pode-se calcular a irradiância,  $E_{\text{egw}}$ :

$$E_{\text{egw}} = H_{\text{egw}} / t = 10,6 / 0,5 \text{ Wm}^{-2} = \mathbf{21,2 \text{ Wm}^{-2}}$$

▪ Exemplo 2:

Determine o limite de exposição  $H_{egw}$  e  $E_{egw}$  dos seguintes tempos de irradiação para um laser visível: (Olhar direto,  $C_E = 1$ ) [c].

a)  $t = 1s$

b)  $t = 0,1ms$

*Fórmulas: mesmas do exemplo 1.*

*A equação tomada da tabela D.4 do anexo D, a qual está na parte de comprimentos de onda visível e exposições entre  $1,8 \cdot 10^{-5}$  e  $10s$ . Compare ambos os resultados.*

*Resolução:*

$$H_{egw} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2}$$

$$a) H_{egw} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2} = \mathbf{18 \text{ Jm}^{-2}}$$

$$E_{egw} = 18/1 \text{ Wm}^{-2} = \mathbf{18 \text{ Wm}^{-2}}$$

$$b) H_{egw} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2} = \mathbf{0,018 \text{ Jm}^{-2}}$$

$$E_{egw} = 0,018/0,0001 \text{ Wm}^{-2} = \mathbf{180 \text{ Wm}^{-2}}$$

*Comparando os dois resultados: pode-se ver que ao baixar o tempo de exposição por uma potência de 4, há o aumento do limite de exposição por um fator de 10.*

▪ Exemplo 3:

Calcule o exato limite de exposição de acordo com a diretriz europeia (tabela D.4 do anexo D) para a radiação laser na faixa visível e para uma duração de irradiação de  $t = 1s$  e compare com o resultado da tabela simplificada 5.2 (olhar direto,  $C_E = 1$ ) [c].

*Resolução:*

*Da tabela completa determina-se por  $H_{egw} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2}$ . O tempo de irradiação é de  $1s$  e  $C_E = 1$ . Então*

$$H_{egw}=18 \text{ Jm}^{-2}$$

$$E_{egw} = 18 \text{ Wm}^{-2}$$

E da tabela simplificada tem-se:

$$H_{egw}=10 \text{ Jm}^{-2}$$

$$E_{egw} = 10 \text{ Wm}^{-2}$$

A tabela pode ser simplificada apresenta grandes desvios

**[PERGUNTA: mesmo a tabela apresentando grandes desvios, ela ainda é útil?]**

▪ Exemplo 4:

Esse exemplo trata da difusão laser quando atinge uma parede difusora. Este exemplo se diferencia dos demais pelo seu  $C_E \neq 1$ . Seguindo com os mesmo dados do exemplo 1, laser vermelho ( $\lambda = 663\text{nm}$ ) de uma duração de 0,5 s, calcule  $C_E$  sendo que desta vez o laser é dirigido para uma parede difusora. O diâmetro do feixe na parede é 10cm e a distância de observação desse feixe é de 2 m <sup>[c]</sup>.

Resolução:

Fórmula: Da tabela D.8 do anexo D. Para  $1,5\text{mrad} < \alpha < 100\text{mrad}$ , então  $C_E = \alpha / 1,5\text{mrad}$ .

Resolução:

O ângulo de visão é:

$$\alpha \approx 0,1/2 = 0,05 = 50\text{mrad}.$$

Com isso obtém-se:

$$C_E = \alpha / 1,5 \text{ mrad} = 50 / 1,5 = \mathbf{33,3}.$$

Com isso, o limite de exposição do exemplo 1, neste caso, aumentará por um fator de difusão de 33,3.

## 6 CAPÍTULO – PERIGOS E MEDIDAS DE PROTEÇÃO



Neste capítulo será abordado os perigos da radiação artificial, apresentando exemplos que constituem os chamados perigos diretos e indiretos. Essa divisão de perigos será usada na avaliação de risco, assunto tratado no capítulo 7 deste trabalho, para descrever a área que esta sendo avaliada.

Na segunda parte há uma discussão sobre as medidas de proteção que devem ser tomadas referente as riscos comentados na primeira parte do trabalho. As medidas serão divididas em três categorias que, por ordem de relevância, são elas: medidas técnicas, organizacionais e pessoais (conhecidas pela sigla “*TOP*”). Cada medida será tratada de modo individual, com o objetivo de mostrar sua importância na avaliação de risco, seu papel e quais riscos são evitados com este conjunto de regras.



## 6.1 PERIGOS ATRAVÉS DA RADIAÇÃO LASER

### 6.1.1 PERIGOS DIRETOS

Os perigos diretos são causados pelo feixe de laser em si, variando apenas o percurso do feixe. Entre eles, podemos distinguir três tipos:

- ◆ Raio laser direto: o feixe de saída do laser atinge o olho sem ter reflexões ou qualquer tipo de desvios.
- ◆ Raio laser refletido: o feixe é refletido por superfícies refletoras até atingir o olho
- ◆ Raio laser difuso: o feixe é atingido em uma superfície difusora, onde os raios serão expalhados em inúmeras direções, atingindo o olho.

Na figura 6.1 está ilustrado cada um destes perigos decorrentes do feixe laser.

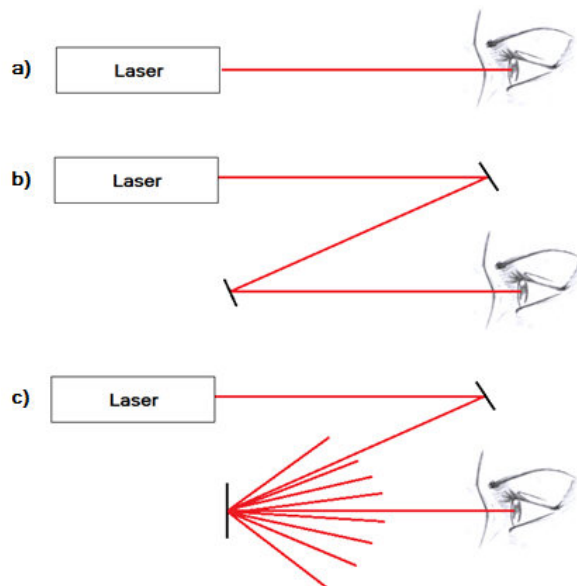


Figura 6.1 Possíveis percursos do feixe laser até atingir o olho. a) raio direto; b) refletido; c) raio refletido e espalhado.

Outro parâmetro ligado aos perigos diretos é a distância de segurança para raio diretos (NOHD), abordado no capítulo 2 deste trabalho <sup>[13]</sup>.

### 6.1.2 PERIGOS INDIRETOS

São perigos não relacionados ao feixe laser acessível, e sim efeitos colaterais gerados pelo aparelho laser <sup>[10]</sup>:

- ◆ Corrente elétrica e tensões:

A radiação laser gera predominantemente energia elétrica. Especialmente em caso de manutenção, devido a tensões elevadas, pode-se motivar perigos elétricos.

- ◆ Radiação óptica incoerente:

A fonte do perigo são, por exemplo, fonte de bombeamento óptico não-coerente tal como radiação secundária, que no processamento de materiais (como soldagem, cortes) podem aparecer.

- ◆ Ofuscamento: **(Pergunta: não deveria ser um perigo direto?)**

O desempenho da radiação laser no espectro visível muito abaixo dos limites de exposição podem causar ofuscamento com perturbação da capacidade de visão.

Em estudos no “*FH Köln*” foi determinado que a irradiação da fóvea (mancha amarela) com um feixe de laser (vermelho) com uma potência de menos de 30μW e um tempo de irradiação de 10s resultou em “*afterimages*” de 300s. O ângulo do brilho e o local de incidência do feixe laser na retina tem muita influência nas consequências (Figura 6.2)



Figura 6.2 Piloto ofuscando através de ponteiro de laser.

#### ◆ Raio X:

Em densidades de energia muito elevadas pode ocorrer radiação ionizante provenientes de radiação *breamstrahlung* e radiação característica.

A influência da radiação laser sobre materiais de densidade de energia abaixo de  $1 \cdot 10^{14} \text{ J/m}^2$  não apresenta raios-x. O limite da dose efetiva para não expor ocupacionalmente pessoas é de 1 mSv e para a pele de 50 mSv por ano.

----	Pessoas ocupacionalmente expostas	Pessoas menores de 18 anos
Dose efetiva	20 mSv	1 mSv
Dose no órgão: lente dos olhos	150 mSv	15 mSv
Dose no órgão: pele, mãos, ante-braço, pés e tornozelo	500 mSv	50 mSv

Tabela 6.1 Limites de radiação para pessoas ocupacionalmente expostas <sup>[10]</sup>.

◆ Atmosfera explosível e substância inflamável:

A proteção contra incêndios na área de segurança de laser é essencial. Áreas vulneráveis incluem áreas com materiais inflamáveis e combustíveis, tais como solventes, cortinas, papelão, e áreas com cabos elétricos.

Exemplo disto é o tratamento com lentes de Zn-Se, onde o perigo vem da quebra da lente e do contato direto com estes fragmentos. Por serem voláteis, são extremamente tóxicos

Mais informações podem ser encontradas no documento TRBS 2152, Parte 3, Secção 5.10

◆ Substância tóxica e perigosa:

A aplicação da radiação laser pode provocar a formação de substâncias tóxicas e carcinogênicas. Além disso, o próprio laser pode conter gases perigosos



## 6.2 MEDIDAS DE PROTEÇÃO

Como um efeito em relação os riscos da operação com um aparelho laser, deve-se ter medidas de proteção. O objetivo das medidas de proteção é tornar o ambiente de trabalho apropriado, com os menores riscos de perigos possíveis. Em §7, secção 1, da legislação do trabalho em relação as radiações ópticas artificiais (OStrV) é observado os seguintes pontos de medidas de proteção (chamados **TOP**) e podem ser encontrados no livro “Laserstrahlung: Technische Regeln” [30].

- ◆ Ponto 1: Medidas de proteção **técnicas** e arquitetônicas;
- ◆ Ponto 2: Medidas de proteção **organizacionais**; e
- ◆ Ponto 3: Medidas de proteção **pessoais**.

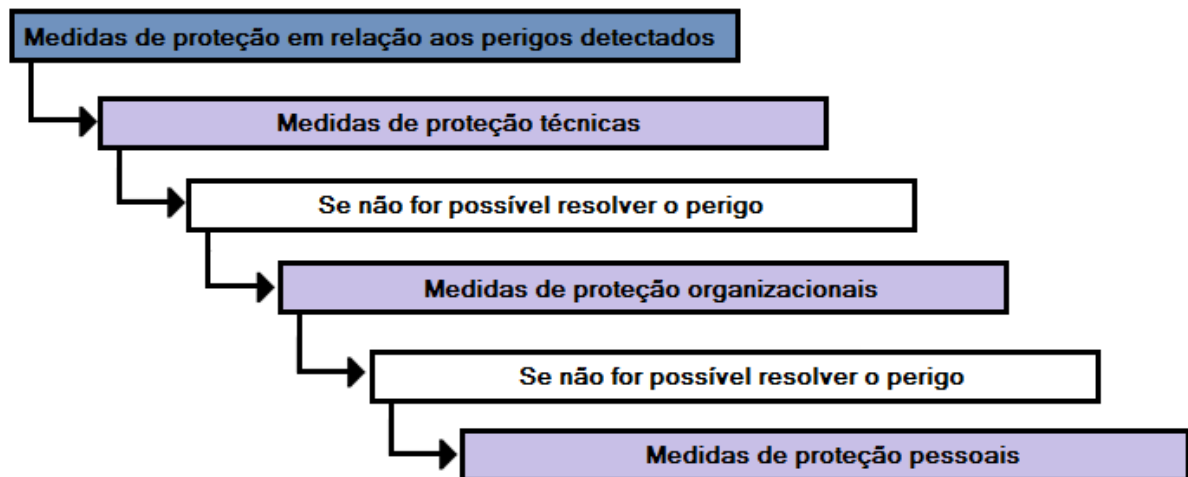


Figura 6.3 Ordem de importância na qual as medidas de proteção devem ser tomadas.

Nos seguintes pontos será discutido mais a fundo para um desses conjuntos de medidas de proteção. Vale lembrar que a eficácia das medidas de proteção escolhidas devem ser verificadas em intervalos regulares e documentadas <sup>[10]</sup>.

### 6.2.1 MEDIDAS DE PROTEÇÃO TÉCNICAS

As medidas de proteção técnicas têm por objetivo prevenir ou minimizar todos os riscos contidos na avaliação de risco. As medidas consistem através de uma separação entre pessoas e perigo, por exemplo, através de uma isolamento da fonte de risco. Como visto no esquema da figura 6.3, as medidas técnicas tem prioridade em relação as medidas organizacionais e pessoais. Nas medidas de proteção, deve-se tomar atenção a pontos como <sup>[10]</sup>:

### 6.2.1.1 Correto posicionamento do aparelho laser

Muitas vezes já é possível através de um correto posicionamento do laser na sala, diminuir significativamente os riscos. Um correto posicionamento consiste em não dirigir o feixe para portas e janelas, como mostrado na figura 6.5. Em caso de na sala laser existir dois ou mais lasers, a correta medida de proteção técnica consiste em separar os aparelhos por cortinas ou telas como ilustrado na figura 6.6 <sup>[10]</sup>:

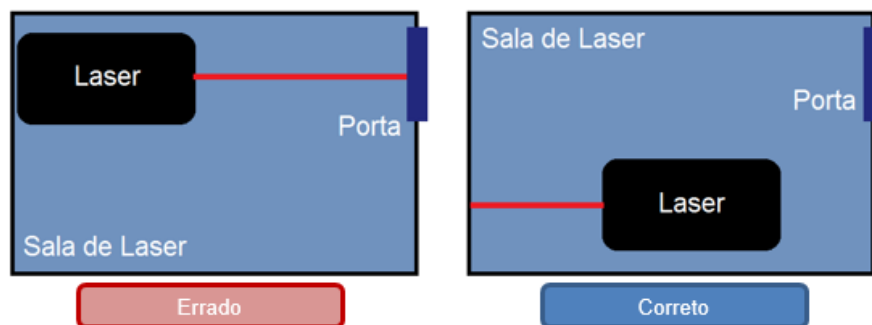


Figura 6.4 Exemplos ilustrados de posicionamento correto e errado do aparelho laser em relação a arquitetura da sala onde ele se encontra <sup>[13]</sup>.

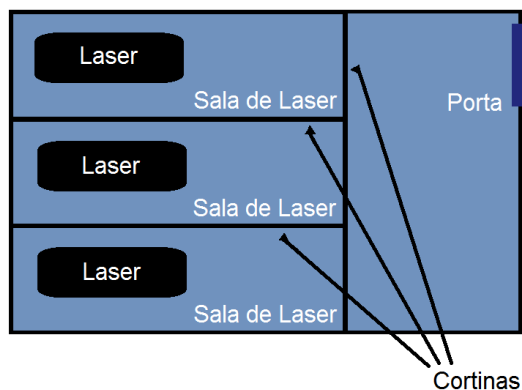


Figura 6.5 Separação de dois ou mais lasers em uma mesma sala <sup>[13]</sup>.

### 6.2.1.2 Delimitação da sala de operação

A delimitação da sala de laser pode ajudar muito na segurança, podendo-se evitar outras medidas (caso o problema seja resolvido). Ao usar lasers classe 3R, 3B e 4, as salas de laser precisam ser delimitadas e identificadas. São exemplos de delimitações <sup>[10]</sup>:

- ◆ Cortinas a prova de fogo;
- ◆ Paredes móveis ativas ou passivas
- ◆ Contato de porta;
- ◆ Célula fotoelétrica;
- ◆ Corrente de vedagem de passagem (quando em ar livre);
- ◆ Paredes reflexivas claras e difusas.

Cortinas e telas divisórias devem atender aos requisitos da norma DIN EM 60825-4 Segurança de equipamentos de laser (no alemão “*Sicherheit von Lasereinrichtungen*”) <sup>[10]</sup>.



Figura 6.6 Exemplo de janela móvel protetora de laser

Quanto a sinalização exterior da sala, nas entradas das salas de lasers deve estar reconhecível se lasers estão em operação ou não. Com essa finalidade, deve-

se ter luzes de advertência no lado de fora da sala de laser. O laser, portanto, deve estar acoplado com a luz de advertência de modo que enquanto o laser estiver em operação a luz esteja sinalizando o uso <sup>[10]</sup>.

#### 6.2.1.3 Medidas de proteção pelo fabricante

Algumas das medidas de proteção serão já inclusas pelo fabricante do aparelho laser. Entre as medidas satisfeitas pelo fabricante, estão <sup>[10]</sup>.

- ◆ Aviso de radiação (óptico ou acústico);
- ◆ Rotulagem de saída do feixe;
- ◆ Interruptor de emergência (dependendo da análise de risco específico do dispositivo);
- ◆ Interruptor de chave de classe 3B (ou um meio adequado para prevenir qualquer pessoa não autorizada de ligar o dispositivo laser);
- ◆ Filtros de observação (cada laser terá um adequado filtro).

#### 6.2.2 MEDIDAS DE PROTEÇÃO ORGANIZACIONAIS

Os perigos que não são possíveis serem eliminados com as medidas técnicas, as medidas organizacionais servirão para cumprir este papel. Entre as principais medidas que compõe a proteção organizacional, estão <sup>[10]</sup>:

- ◆ Nomeação do responsável pela proteção laser (técnico de proteção laser nível 2);
- ◆ Identificação da sala laser;
- ◆ Ensino;
- ◆ Restrições.



Adiante será abordado em cada seção um destes pontos, abordados informações e conceitos importantes para a formação correta das medidas de proteção organizacionais <sup>[10]</sup>.

#### 6.2.2.1 Técnico de proteção laser nível 2

De acordo com §5 (2) do OStrV, o empregador deve nomear, antes do início da operação de lasers de classe 3R, 3B e 4, um **técnico de proteção laser com especialização nível 2** (do alemão “*Laserschutzbeauftragte*”). A habilidade deve ser verificada mediante a conclusão bem-sucedida de um curso aprovado <sup>[10]</sup>.

O empregador seleciona a pessoa apropriada para o papel de técnico segurança de laser. A ordem deve ser feita por escrito, contendo os direitos e deveres de cada um, e caso precise, deve haver “transmissões de deveres” caso a pessoa selecionada não esteja apta a atendê-los em algum momento. Vale ressaltar que, o contratante pode ser a própria pessoa especializada nível 2. O formulário de contratação de um técnico de segurança laser pode ser encontrado no anexo B deste trabalho <sup>[10]</sup>.

Algumas informações importantes sobre o técnico de proteção laser foram organizadas em formas de perguntas por motivos de clareza e organização deste trabalho. Seguem as perguntas <sup>[10]</sup>:

- ◆ Quem pode ser nomeado como responsável pela proteção de laser?

*O técnico de proteção de laser deve ter concluído uma formação profissional técnica, científica, médica ou cosmética (respectivamente, pelo menos, dois anos) e ter no mínimo dois anos de experiência profissional.*

- ◆ Quais critérios devem ser relevados na escolha do técnico de proteção de laser?

*O técnico deve ter um bom conhecimento técnico, de alta competência social e aceitação de seus colegas.*

◆ Apoio do empregador ao técnico de proteção de laser

*Para que o técnico de proteção de laser desempenhe adequadamente suas funções, ele requer o apoio do empregador. Isso deve reger de forma clara as responsabilidades e assegurar a necessária aceitação desta importante função pelos demais funcionários. O técnico deve ser envolvido nos processos internos regularmente e ser informado sobre quaisquer alterações.*

◆ Quais são as tarefas do técnico de proteção de laser?

*Entre as tarefas do técnico de proteção laser, estão:*

- *Suporte do empregador ou da pessoa especializada nível 2 na preparação da avaliação de risco;*
- *Implementação das condições estabelecidas nas medidas de proteção de avaliação de risco;*
- *Suporte do empregador na formação/instrução dos funcionários;*
- *Garantir a operação segura de dispositivos lasers, no entanto, não havendo presença obrigatória; e*
- *Agir em cooperação com especialistas de segurança e médicos da empresa*

◆ Transferência de deveres

*O empregador tem a possibilidade, através de uma, assim chamada, transferência de deveres, transferir algumas responsabilidades dele para o técnico de proteção de laser. Exemplos de transferências são: implementação da avaliação de risco e formação dos funcionários.*

◆ Quais são os conhecimentos que o técnico de proteção laser nível 2 deve ter?

O técnico de proteção laser deve adquirir seus conhecimentos em cursos especializados nível 2. Eles devem ter conhecimentos sobre os seguintes tópicos:

**[PERGUNTA: Fazer um tópico separado sobre cursos especializados nível 1 e 2?]**

- Base jurídica (Leis de proteção ao trabalhador, OStrV, Regras técnicas de radiação laser, regulamentos de prevenção de acidentes, normas e regulamentos especiais de segurança de laser);
- Características físicas e efeitos biológicos da radiação laser;
- Classe de laser e valores limites;
- Ameaças diretas e indiretas através da radiação laser;
- Seleção, implementação e monitoração de medidas de proteção (princípio TOP);
- Direitos e obrigações do técnico de proteção de laser;
- Conteúdo de instrução dos empregados;
- Estrutura e conteúdo da avaliação de risco; e
- Operação segura do dispositivo de laser.

◆ Quais são as responsabilidades do técnico de proteção laser?

O técnico de proteção de laser é, de acordo com OStrV, responsável pelas atividades desempenhadas. Consequentemente, ele é responsável pelas infrações cometidas. Conforme §11(2) OStrV infração administrativa que intencionalmente ou por negligência viola as regras contra a proteção do laser são:

- Intencionalmente, ação cometida por qualquer um que leva em aprovação ou aceite que surja uma situação errônea através de ações próprias.

➤ *Age negligentemente, ação que permite que os cuidados necessários não sejam levados em conta. Se houver um acidente envolvendo uma lesão física ou até mesmo a morte, isso será uma ofensa criminal de infração.*

#### **6.2.2.2 Identificação da área de operação**

A área de laser é caracterizada pelo facto dos valores limites de exposição poderem ser ultrapassados. Por isso, a área de laser deve estar delineada e identificada por §7 parágrafo 3 do OStrV. A adequação da definição deve ser avaliada para cada local e de acordo com o risco separadamente e deve ser revisado periodicamente <sup>[21]</sup>.

A radiação laser é sempre mais ou menos divergente. O aumento do diâmetro do feixe com o aumento da distância, irá diminuir a radiância conforme o aumento da distância a partir do laser <sup>[21]</sup>.

Quanto a organização das áreas laser, as seguintes figuras 6.9 e 6.10 são exemplos para a identificação e delimitação de áreas de laser. A primeira mostra a separação e a identificação de toda a sala como sala de laser para aplicações industriais. O bloqueio na porta da frente (interlock) pode ser substituído por outras medidas de demarcação. A segunda figura mostra a separação e a identificação de uma zona transitável dentro da sala de laser para aplicações industriais <sup>[21]</sup>.

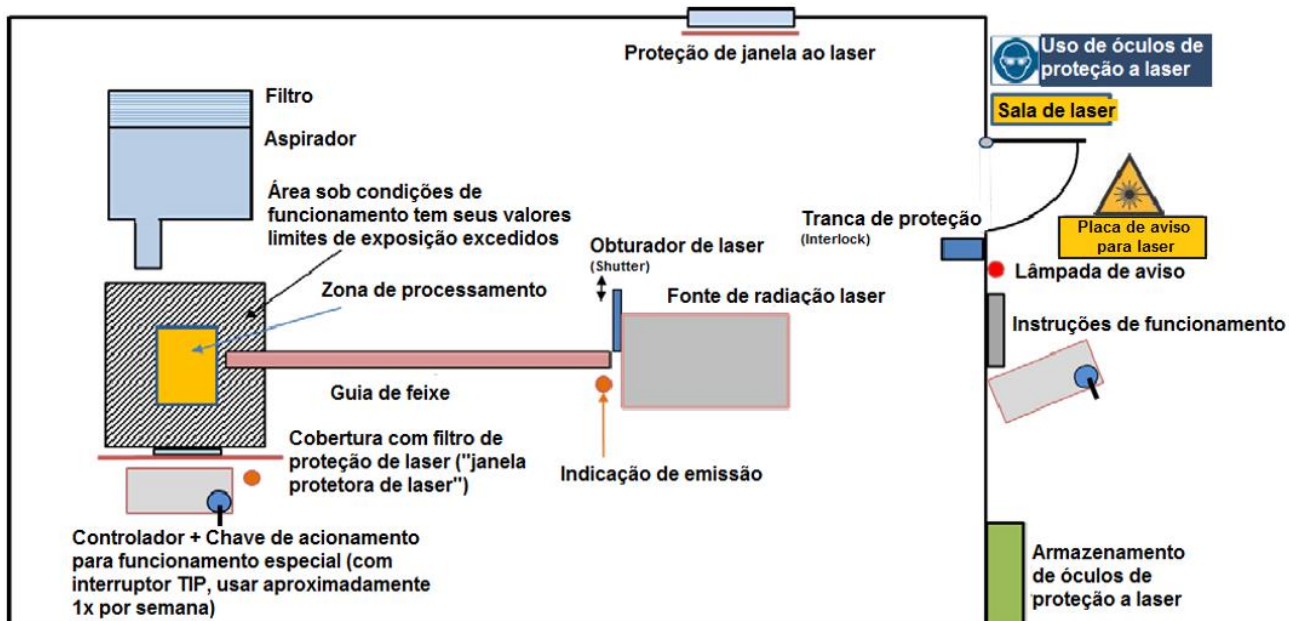


Figura 6.7 Exemplo de sala laser [21].

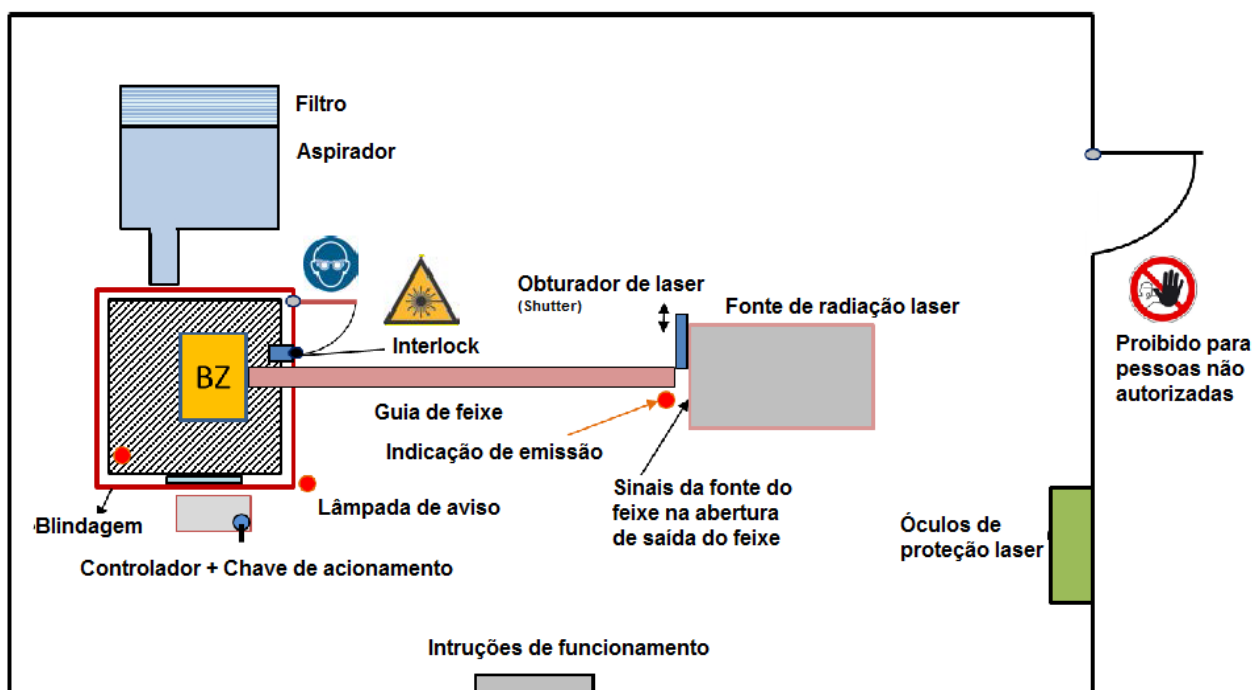


Figura 6.8 Exemplo 2 de sala laser [21].

Algumas placas de advertência devem ser penduradas no serviço de modo a restringir o acesso apenas a pessoas autorizadas. Na figura 6.9 é mostrado exemplos de placas. A figura 6.9 b) foi retrada de documentos alemães, a qual é geralmente usada nas áreas de operação com lasers na alemanha, já a figura 6.9 a) mostra a placa usada usualmente no brasil com o mesmo objetivo.



Figura 6.9 Placas de advertência para a restrição de pessoas no local.

Duas importantes placas que devem ser usadas em um serviço de laser, dependendo da classe de laser em questão, é a placa de uso de óculos de proteção (figura 6.10 a)) e a placa confirmando a presença de laser na sala (figura 6.10 b)). Ambas são mostradas na figura abaixo.

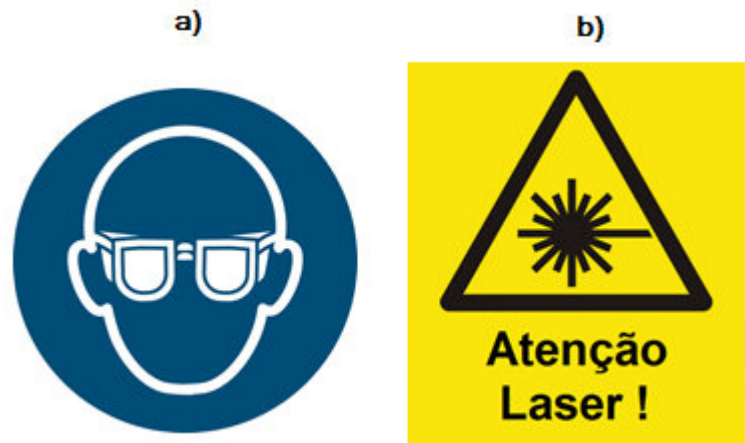


Figura 6.10 a) Placa indicando o uso de óculos de proteção laser e b) placa indicando a presença de aparelho laser na sala <sup>[10]</sup>.

As informações referentes as instruções de funcionamento devem estar em local de fácil acesso e visível a todas as pessoas que estão em operação, um exemplo desta placa pode ser encontrado no anexo C deste trabalho.

#### 6.2.2.3 Ensino

A base do ensino é a avaliação de risco que será abordada no próximo capítulo deste trabalho. As pessoas ocupacionalmente expostas devem ser capazes de avaliar os perigos diretos e indiretos relacionados ao laser. Para isso é necessário que todo o grupo de prestação de serviço tenha consciência dos riscos que estão sendo expostos saibam medidas devem tomar para que estejam seguros. A base jurídica se assenta em <sup>[10]</sup>.

- ◆ ArbSchG §12
- ◆ BetrSichV §10
- ◆ BGV A1 §4
- ◆ BGV B2 §6
- ◆ OStrV

Algumas informações importantes sobre o técnico de proteção laser foram organizadas em formas de perguntas por motivos de clareza e organização deste trabalho, como feito já feito na seção 6.2.2.1. Seguem as perguntas <sup>[10]</sup>:

◆ Quem ensina os trabalhadores?

*O trabalho de ensino é tarefa do empresário. Ele é apoiado pelo técnico de segurança de laser.*

◆ Com que frequência deve ocorrer o ensino?

*O ensino deve ser feito:*

- *Antes do primeiro uso do laser na área de trabalho;*
- *Após qualquer modificação da rotina de trabalho;*
- *Pelo menos uma vez por ano;*
- *Após acidentes ou riscos de acidentes;*
- *Ou em intervalos menores, em casos especiais.*
- *O treinamento deve ser realizado em uma linguagem compreensível para os trabalhadores. Surgem regulamentos de proteção ao trabalhador, por exemplo, §29 em casos em que haja jovens no meio de trabalho o ensino deve ser realizado semestralmente (fonte: TROS Laserstrahlung Teil 1).*

◆ Quem deve ser instruído?

*Todas pessoas que trabalham na área de laser ou que estão relacionadas direta ou indiretamente com o laser.*

◆ Quais conteúdos devem ser abordados durante a instrução?

*Os assuntos que devem ser abordados são:*

- *Perigos inerentes a profissão;*



- *Informações sobre os valores limites de exposição e sua importância;*
- *Resultados, explicação e avaliação do significado das exposições, avaliação dos potenciais de riscos e consequências para a saúde;*
- *Descrição de práticas de trabalho com o objetivo de minimizar riscos;*
  - *Medidas que podem ser tomadas para eliminar ou reduzir riscos;*
  - *Uso adequado do equipamento de proteção pessoal;*
  - *Riscos indiretos decorrentes de radiações ópticas artificiais para a segurança e a saúde dos trabalhadores, por exemplo, cegueira temporária (Reidenbach 2008), trabalhos perigosos no trabalho de metais, proteção contra incêndios e explosões;*
  - *Notas explicativas (por exemplo, efeitos fotossensibilizantes) de medicamentos, cosméticos e materiais perigosos e também a possibilidade e disponibilidade de equipamentos alternativos que resultem em uma menor exposição (teste de substituição);*
  - *Comportamento na zona de laser durante o uso normal, em particular erros possíveis (como desparafusar a tampa do dispositivo laser);*
    - *Comportamento na área de laser para serviço e manutenção; e*
    - *Caso de acidente na área de laser (lista de potenciais situações de emergência e descrição das medidas de resgate associadas / evacuação, treinamento preventivo para socorristas e força de resgate).*
  - *A exposição de trabalhadores por várias fontes de radiações ópticas artificiais;*
  - *Instruções do fabricante para fontes de radiação óptica e ambiente de trabalho;*
  - *Classificação de radiação ultravioleta, visível e infravermelha; e*

➤ *A partir da radiação incoerente, comparar os perigos de lasers classe 3R, 3B e 4.*

◆ Como é o treinamento em caso de empregos temporários?

*Se houver caso de trabalhadores temporários, há a obrigação de treinamento específico da empresa com esses trabalhadores temporários de acordo com §12 ArbSchG. Devem ser instruídos sobre os problemas associados aos perigos da atividade específica dada a eles. Outras obrigações em matéria de proteção dos direitos trabalhistas, em particular a obrigação de instrução geral (independente do trabalho específico ou área de tarefa) permanecem inalteradas.*

#### **6.2.2.4 Restrições**

Ao se trabalhar com o aparelho laser, devem ser tomadas algumas medidas de modo a restringir o acesso das pessoas, a fim de evitar ao máximo qualquer acidente. Para isso <sup>[10]</sup>:

- ◆ As únicas pessoas permitidas na área de laser são aquelas já instruídas sobre os perigos;
- ◆ O sistema de laser pode ser ligado apenas por pessoas autorizadas para esse efeito. Isso deve estar contido na avaliação de risco;
- ◆ O número de pessoas com a autorização de portar as chaves do laser deve ser limitado ao mínimo possível;
- ◆ Adolescentes não devem ser inseridos em áreas de laser;
- ◆ O empregador não pode empregar adolescentes onde há dispositivos de laser classe 3B e 4, sendo que isso não se aplica para jovens com mais de 16 anos de idade caso se tenha como objetivo o treinamento do jovem e que seja garantida a proteção do mesmo por meio de supervisão.

### 6.2.3 MEDIDAS DE PROTEÇÃO PESSOAIS

Os perigos que não foram possíveis serem eliminados com as medidas de proteção técnicas e organizacionais, devem ser deixados para que sejam eliminados com as medidas de proteção pessoais. Entre as medidas de proteção, pode-se citar fundamentalmente duas <sup>[10]</sup>:

- ◆ O uso de óculos de proteção laser;
- ◆ Uso de roupas de proteção laser.

Nos próximos pontos será abordado as principais informações sobre cada uma destas medidas <sup>[10]</sup>.

#### 6.2.3.1 Óculos de proteção laser

Os óculos de proteção laser são equipamentos de proteção individual (EPI's) de acordo com a Diretriz 89/686/EWG. Eles podem ser colocados nos países da união europeia apenas com o certificado de exame e com a marca CE. Na tabela 6.3 encontra-se a relação da importância do uso de óculos de proteção laser para cada uma das classes <sup>[10]</sup>.

Classe de Laser	Necessidade de óculos
1, 1M, 2, 2M	Em geral não é necessário apenas com a intenção de olhar deliberadamente para o feixe
3R	Recomenda-se o uso de óculos de segurança

Tabela 6.2 Relação da classe de laser e a importância do uso de óculos de proteção laser <sup>[10]</sup>.

Os óculos são projetados para proteger os olhos contra a radiação laser para cada comprimento de onda no ultravioleta, visível e infravermelho durante pelo menos 10s/5s e pulsos de 100/50. Porém, mesmo com óculos de proteção, é aconselhado nunca olhar diretamente para o raio laser <sup>[10]</sup>.

#### ◆ Efetividade do óculos de proteção laser

A efetividade dos óculos de proteção depende, fundamentalmente, de:

##### ➤ Filtro de absorção:

Nesse tipo de filtro, por exemplo, pigmentos e corantes de plásticos são incorporados no vidro, na qual a radiação laser é absorvida. O filtro de absorção de comprimento de onda laser deve ser, contudo, tão transparente quanto possível para o resto do espectro visível. Daqui resulta o fato de que o filtro de absorção é usado apenas para determinados comprimentos de onda de laser, transformando a parte da luz absorvida em calor <sup>[10]</sup>.

##### ➤ Filtro de reflexão:

Neste tipo de filtro de vidro, através de interferência multifeixe, quase 100% da radiação laser é reflectida. As camadas revestidas são mecanicamente muito estáveis, mas também muito finas e podem ser danificadas em qualquer circunstância. Os menores arranhões podem já não assegurar a proteção contra a radiação laser. Normalmente esses filtros são usados para altas potências de lasers <sup>[10]</sup>.

#### ◆ Critérios para a escolha dos óculos

Alguns critérios devem ser seguidos quanto a escolha do mais adequado óculos de proteção laser. Será abordado todos os termos que identificam um óculos e como fazer sua determinação. Então eles, estão <sup>[10]</sup>:

➤ Comprimento de onda

Devido a absorção da radiação pela lente apenas em alguns intervalos do espectro, o comprimento de onda em que os óculos oferecem proteção deve estar anotado. Em relação a isso, pode ser especificado como um valor discreto ou uma faixa.

➤ Modo de operação

Os óculos de segurança laser também dependem dos modos de operação do laser, os seguintes indicadores são indicados no corpo do suporte ou do filtro:

D	para laser de onda contínua (cw)
I	para laser de impulso
R	para laser de impulso gigante
M	para laser de impulso modo acoplado

A tabela 6.11 mostra a delimitação temporal em relação aos tipos de lasers.

Tempo em s	Comprimento de onda em nm			
	180 a 620	620 a 1050	1050 a 1400	1400 a 10 <sup>6</sup>
<10 <sup>-9</sup>	Laser impulso modo acoplado			
10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-7</sup>	Laser impulso gigante			
10 <sup>-7</sup> a 0,005	Laser de impulso			
0,005 a 0,05				
0,05 a 0,1				
0,1 a 0,5				
>0,5	Laser de onda contínua			

Figura 6.11 Delimitação temporal dos tipos de lasers para seleção dos filtros de proteção de acordo com a norma DIN EM 207 [26].

### ➤ Nível de proteção e densidade óptica

Em óptica, a densidade óptica (DO) é usada na medida da atenuação da radiação. Onde

$$D = -\log \tau \quad (6.2.1)$$

$$\tau = \frac{P_1}{P_0} \quad (6.2.2)$$

Sendo:

$\tau$  Transmissão

$P_0$  Potência inicial (frente)

$P_1$  Potência final. OD de 1 corresponde a  $\tau = 10\%$ , OD de 2 corresponda a  $\tau = 1\%$  e OD 3 corresponde a  $\tau = 0,1\%$ .

De acordo com a norma DIN 207, não é suficiente usar apenas o OD como um nível de proteção. Uma vez que seja levado em consideração apenas o OD, o material poderia ser destruído pela

radiação. É por isso que é dado um nível de proteção L, o que garante que os óculos suportem pelo menos 5 segundos e 50 pulsos de radiação LB1 pelo menos OD1, LB2 pelo menos OD2, LB3 pelo menos OD3.

Os níveis de proteção de filtro vão desde LB1 a LB10, para determinar o níveis de proteção do óculos necessário para a operação laser há com a relação entre as faixas de transmitância espectral do laser e os níveis de proteção adequado para o óculos. A tabela se encontra no anexo D, tabela D.1

➤ Outras características

Outras características sobre os óculos do fabricante é a marca de teste de força.

Para um óculos de proteção laser várias marcas são pertinentes, são elas a marca de identificação do fabricante, de identificação de teste e uma marca de teste de resistência apenas uma vez fixada, ademais os elementos de identificação estão com um sinal de mais (+) com o propósito de separação.

◆ Identificação dos óculos de proteção

Existem dois tipos de óculos laser, o óculos de proteção normal (fixo) e o óculos de proteção laser ajustável. Serão separados devido a sua identificação variar <sup>[26]</sup>.

➤ Óculos de proteção laser

Como dito anteriormente, o nível de proteção do óculos é calculo pela tabela D.1, anexo D. A identificação pode ser muito extensa quando o filtro protege contra vários comprimentos de onda. Neste caso, a marcação pode ser resumida como no exemplo a seguir:

10600	D LB3 + IR LB4
1064	DI LB8 + R LB9
633	D LB4 + IR LB5

A figura 6.12 mostra um esquema explicativo de cada termo da identificação do óculos de proteção laser [26].

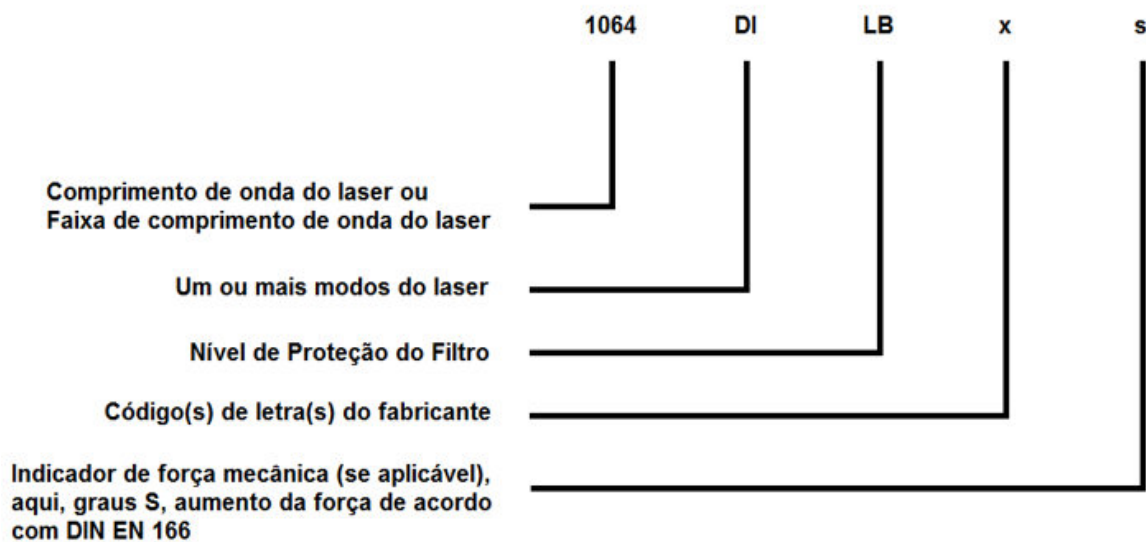


Figura 6.12 Esquema de explicação da marcação dos óculos laser [26].

### ➤ Óculos de proteção laser ajustável

Óculos de laser ajustáveis são limitados na gama de comprimentos de onda da radiação visível entre 400nm e 700nm. Eles enfraquecem a radiação laser para valores de laser de classe 2, o que significa um máximo de 1 mW. Eles são usados para observar com segurança reflexão difusa de radiação laser.

O grau de proteção destes óculos vai de R1 a R5 e para a determinação, utiliza-se a tabela D.2 do anexo D deste trabalho. A tabela



relaciona o grau de proteção com a transmitância espectral do laser e o intervalo de tempo que o laser está em uso.

A figura 6.13 mostra um exemplo explicado de como é feita a identificação para um óculos de proteção laser ajustável de acordo com a DIN EN 208. No corpo do óculos ou no visor deve vir escrito “óculos ajustável”.

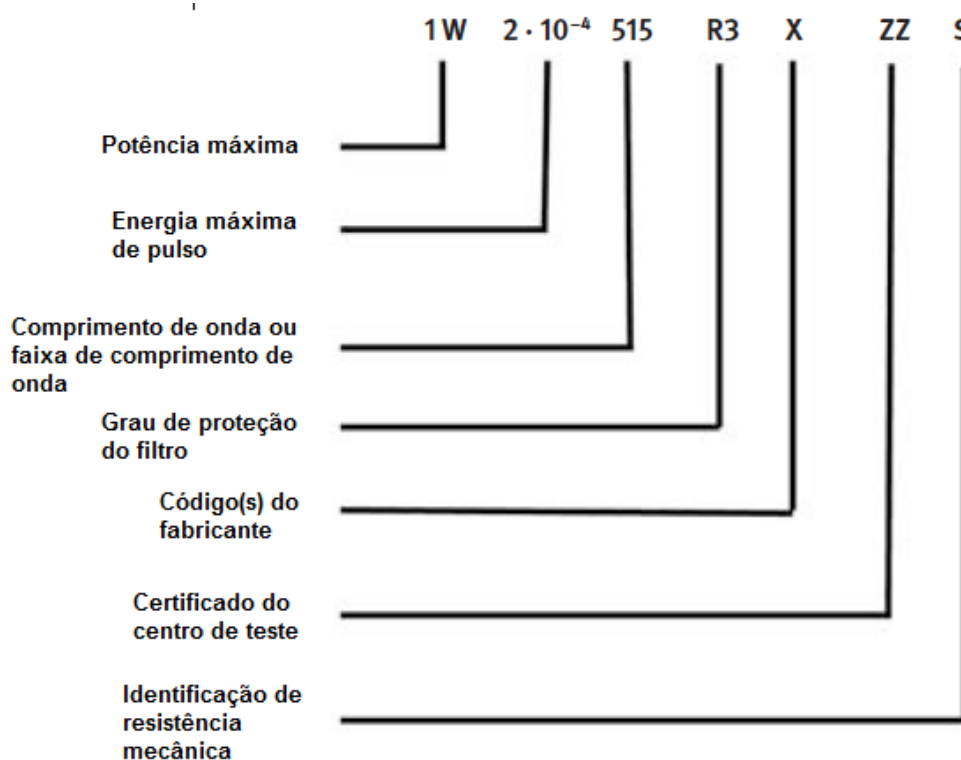


Figura 6.13 Exemplo de identificação de um óculos de proteção laser ajustável [26].

Na denominação sobre o grau de proteção do óculos, há duas formas:

633 R2 (R indica a versão 2002 da EN 208), e

633 RB2 (RB indica a versão 2009 da EN 208).

#### ◆ Instruções de tratamento

O óculos laser deve ser tratado com cuidado por conta de suas lentes pois qualquer prejuízo as lentes pode ocasionar em perda da proteção. Entre os cuidados que devem ser tomados, estão <sup>[26]</sup>.

- Proteger o filtro contra substâncias tais como ácidos ou exemplos tóxicos como gases e vapores reativos;
- Não deixar os óculos com o filtro para baixo;
- Manter os filtros longe de corpos de aquecimento ou dispositivos de aquecimento;
- Guardar o óculos em lugar seco e em um recipiente resistente

#### ◆ Limpeza e manutenção

Normalmente a limpeza do óculos de proteção laser e óculos ajustável de laser devem ser limpos com água limpa e detergente neutro (como por exemplo, um produto leve para a limpeza de vidros doméstico) e secos com um pano macio. Os seguintes pontos devem ser respeitados <sup>[26]</sup>.

- Filtro não deve ser limpo
- Não colocar em água
- Não limpar com produtos químicos ou produtos afiados/pontiagudos.
- Não colocar soluções esterilizantes ou desinfetantes que não seja fornecido pelo fabricante
- Reparos, manutenções corretivas são geralmente feitos pelo fabricante.

#### ◆ Sinalização de Segurança

A sala de operação deve, sempre que a classe de laser exigir, ter a placa de uso de óculos de proteção laser e deve estar em local visível para todas pessoas relacionadas ao uso do aparelho laser. A sinalização pode ser vista na figura 6.10a) [26].

#### 6.2.3.2 Roupas da proteção laser

Em lasers cuja radiação pode exceder os valores limites de exposição para a pele, também uma relevante marcação deve ser encontrada pelo fabricante (como por exemplo, “a irradiação pode causar queimaduras”).

Proteção de rosto (viseira) e luvas podem ser especialmente úteis com radiações na faixa do ultravioleta, conseguido através de um laser UV (por exemplo, laser de excímero) [10].

#### 6.2.4 INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃO

Do alemão “*Betriebsanweisung*”, as instruções de operação contém informações a área laser, perigos para as pessoas, medidas de proteção e regras de conduta, comportamento em problemas e acidentes e fechamento do serviço. Um exemplo das instruções de operação [21].

##### ◆ Área laser

As instruções de uso devem ser definidas para cada área de operação. Na qual para cada efeito deve existir uma proteção calculada. Por exemplo, “Proteção contra radiação laser”. Deve ser documentado informações sobre o laser, como:

- Classe de laser
- Modo de operação
- Comprimento de onda
- Potência do laser

#### ◆ Perigos para os seres humanos

Deve ser descrito quais danos sobre a saúde da pessoa poderão ocorrer devido as efeitos descritos. Também deve-se referir ao órgãos alvo (olhos e pele):

- Perigos de ofuscar
- Lesões oculares
- Lesões na pele
- Perigo de vida (Laser de alta potência com potência de laser de muitos kW).
- Outros perigos através de efeitos indiretos (perigos de incêndio, risco de explosão, perigos através da radiação óptica incoerente, perigos através da radiação ionizante, gases, vapores, poeiras, névoas e aerossóis).

#### ◆ Medidas de proteção e regras de conduta

Esta seção determina quais comportamentos são realizados na sala de operação. Isto é formulado como um anexo para as instruções de operação. As ações que compõem geralmente essa seção, são:

- A observância dos valores-limites de exposição;
- Verificar o teste diário de desligamento forçado da radiação de cobertura e mascaramento de sistema com monitoramento automático;
- Efeitos da blindagem;

- Proteção contra reflexões;
- Sistema de captura necessários em por exemplo, na originação de materiais perigosos;
- Estabelecimento de sinais de identificação de perigos;
- Uso de óculos de proteção laser ou de ajuste laser e outros equipamentos de proteção individual.

#### ◆ Comportamento em caso de problemas

Esta seção especifica como os funcionários devem se comportar em problemas. É assim estabelecido uma ordem de prioridade, por exemplo:

- Em caso de ameaças/perigos evidentes antes ou durante o trabalho os supervisores ou o trabalhador responsável devem ser avisados.

Nome: ...

Telefone: ...

- O trabalhador responsável é autorizado e obrigado, em casos necessários, interromper ou parar o trabalho;
- As interrupções no local de trabalho deve ser protegidas; e
- Manutenção, serviço e reparação é apenas através de uma empresa e após da ordem ser dada pelo trabalhador responsável.

#### ◆ Comportamento em caso de acidentes

Descreve as medidas a se tomar em caso de acidentes. O objetivo é a redução de risco imediato (por exemplo, acionamento da chave de emergência), tornando salvo o ambiente com laser. Um exemplo disso é:

- Em caso de acidentes com vítimas, salvar as vítimas.

- Cena do acidente salva, aviso do médico de urgência, primeiros socorros
- Número de emergência: 112
- Primeiros socorros: 112 ou
- Numero de notificação de acidentes: ....

◆ Fechamento do serviço

Em caso de fechamento do serviço com laser, deve ser tomada medidas para deixar a sala devidamente segura, arrumada, controlada e os equipamentos limpos

### 6.2.5 EXEMPLOS DE DETERMINAÇÃO DO TIPO DE ÓCULOS DE PROTEÇÃO

Todos os exercícios foram retirados do livro do curso “*laserschutzbeauftragte*”.

◆ Exemplo 1:

Um aparelho laser cw com radiação vermelha (660nm) tem uma potência de  $P=350\text{mW}$  e uma seção de feixe de  $A=0,7\text{cm}^2$ .

- a) Calcule a densidade de potência  $E$ ;
- b) Determine o grau de proteção para um óculos de proteção laser;
- c) Qual denominação deve constar no óculos de proteção;
- d) Qual denominação deve constar em um óculos de proteção ajustável;
- e) Quais danos ao olhos podem ser esperados sem o uso do óculos de proteção.

*Resolução*

- a) A irradiância = densidade de potência é:

$$E = \frac{P}{A} = \frac{0,35}{0,7 \cdot 0,7 \cdot 10^{-4}} \frac{W}{m^2} = 5000 \frac{W}{m^2}$$

b) De acordo com a tabela D.1 do anexo D, deve ser escolhido o grau de proteção **LB3**.

c) **D 640 – 680 LB3**

d) **1W 660 RB3**

e) Deve-se esperar danos pesados até riscos de perda de visão.

#### ◆ Exemplo 2

a) Calcule as informações para um óculos de proteção laser para policiais, os quais estão sujeitos a ponteiros lasers (verdes, 532nm) com seção de 1mm<sup>2</sup> e uma potência de 300mW.

b) Poderia neste caso escolher um óculos de proteção laser ajustável?

#### Resolução

a) A irradiância é:

$$E = \frac{P}{A} = \frac{0,3}{10^{-6}} \frac{W}{m^2} = 3 \cdot 10^5 \frac{W}{m^2}$$

Consequentemente o grau de proteção do óculos é **LB5**

E a identificação do laser é **D480 – 540 LB5**

b) A identificação para um laser ajustável seria **1W 480 – 540 RB3**

Seria, sim, possível escolher um laser ajustável. Ele protegeria porém abaixo de 600mW apenas por 2s.

## 7 CAPÍTULO - AVALIAÇÃO DE RISCO



A avaliação de risco é uma questão central da saúde e segurança e inclui um estudo sistemático de todos os aspectos do trabalho. É projetado para reconhecer os perigos e quais as necessárias medidas de proteção que devem ser devidamente tomadas (Figura 7.1).

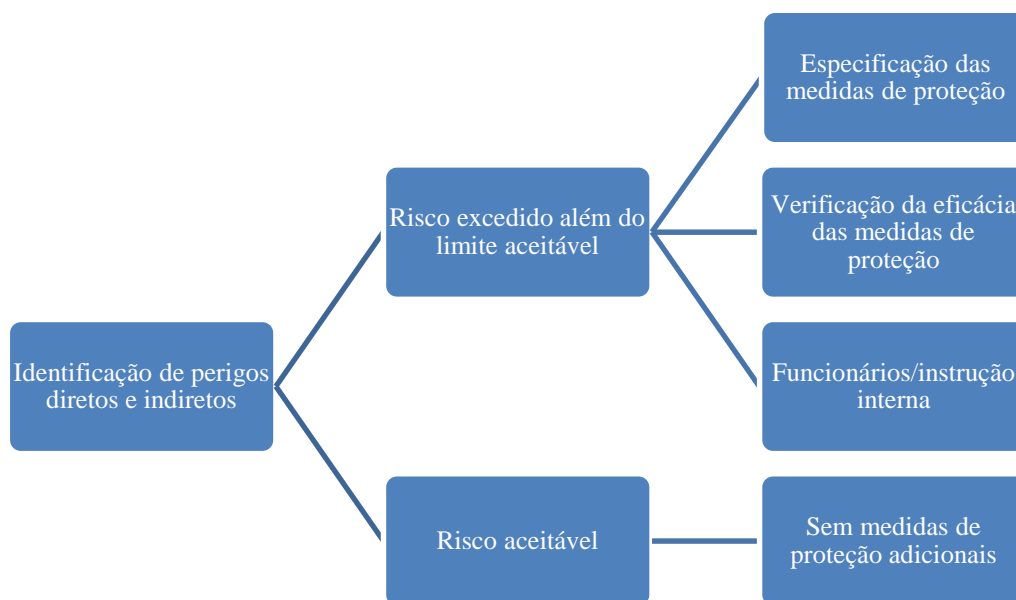


Figura 7.1 Caminho de identificação de perigos e medidas a serem tomadas <sup>[10]</sup>.



A avaliação de risco não é um processo singular, feito uma vez e encerrado, e sim um processo contínuo, precisando sempre ser feito e re-avaliado de tempos em tempos (Figura 7.2)

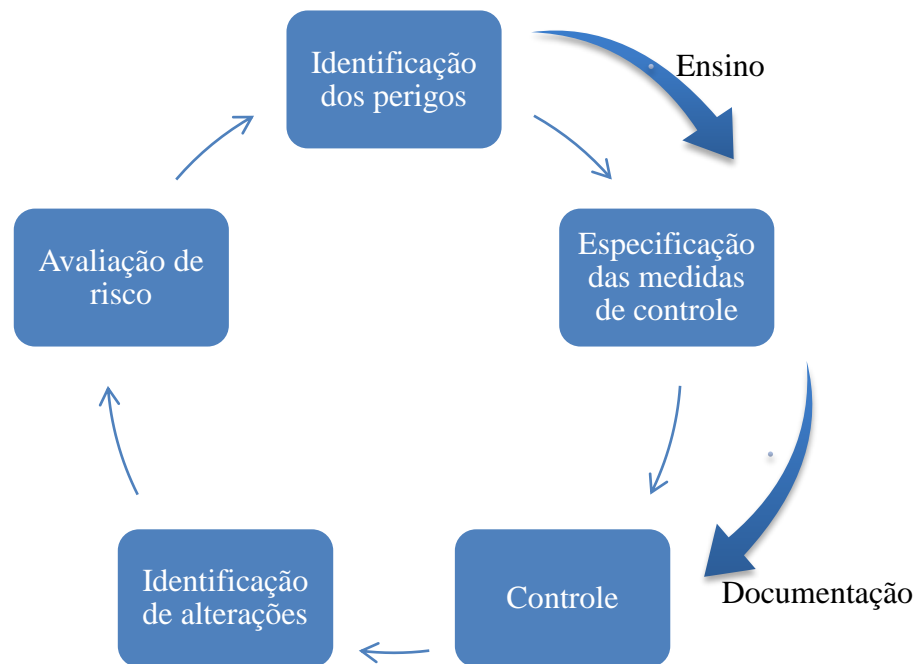


Figura 7.2 Esquema sobre as etapas da avaliação de risco <sup>[13]</sup>.

A avaliação de risco da atividade ou do lugar de trabalho relacionado serve para avaliar as condições concretas das características da atividade ou do ambiente de trabalho envolvido. Na avaliação de risco, os riscos são avaliados isoladamente, como por exemplo, instrumentos de trabalho que estão no ambiente de operação em questão, cada instrumento será avaliado independentemente <sup>[10]</sup>.

A avaliação de risco pessoal deve ser feito para pessoas relacionadas a atividades e com que precisam de proteção, como por exemplo, pessoas com

deficiência, gestantes, estagiários, iniciantes na atividade. Para jovens e gestantes **deve ser** feito a avaliação de risco como esta previsto em lei <sup>[10]</sup>.



## 7.1 FUNDAMENTOS DA AVALIAÇÃO DE RISCO

### 7.1.1 *RESPONSÁVEL PELA AVALIAÇÃO DE RISCO*

A responsabilidade geral de avaliação de riscos encontra-se com o empregador. Caso o empregador não disponibilize de um técnico de segurança nível 2 ou um especialista de segurança de trabalho, ele pode ser apenas aconselhado pelos mesmos. Para tal tarefa, há também a opção do empregador delegar a avaliação de riscos a estas pessoas <sup>[19]</sup>.

A pessoa especializada nível 2 é a pessoa para a execução da avaliação de risco. Na acepção de §5 secção 1 do OStrV, é aquele que têm conhecimentos suficientes sobre os riscos causados pela radiação laser, devido a sua formação especializada ou experiência, e conhecimento de regras e regulamentos de tal ponto que possam avaliar as condições de trabalho antes do início das atividades e avaliar as medidas de proteção que devem ser estabelecidas. Entre as qualificações requeridas por um técnico de segurança laser, estão <sup>[19]</sup>.

- ◆ Regulamentos aplicáveis neste domínio;
- ◆ Efeitos da radiação laser (para pele, olhos e materiais);

- ◆ Procedimento para a avaliação de efeitos de troca ou combinação de diferentes fontes de laser;
- ◆ As medidas de proteção técnicas, organizacionais e pessoais (em particular cálculo e seleção de óculos de proteção de laser, óculos de ajuste de laser e caixas de segurança);
- ◆ A avaliação da eficácia das medidas de proteção;
- ◆ A documentação da avaliação de riscos.

Mais informações sobre o técnico de segurança laser nível 2 serão abordadas no capítulo 8 deste trabalho <sup>[10]</sup>.

### 7.1.2 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE EXPOSIÇÃO

Os valores de limites de exposição dependem basicamente do comprimento de onda e da tempo de irradiação. Os cálculos explicados estão no anexo 4 do documento TROS parte 2. Os valores obtidos devem ser documentados na avaliação de risco e servir, entre outras propósitos, de marcação da área de laser. Os cálculos dos valores de exposição podem ser calculados, em muitos casos, a partir das especificações do fabricante como potência de laser, energia do pulso, raio do feixe, largura do pulso, divergência do feixe ou especificação do caminho do feixe óptico. Estes cálculos devem ser executados por uma pessoa especializada nível 2 de acordo com o nível tecnológico. Entre os cálculos mais importantes, estão <sup>[10]</sup>:

- ◆ Densidade de potência (irradiância) com laser de onda contínua
- ◆ Densidade de energia (radiação) em laser pulsado
- ◆ Duração de pulso, frequência de pulso, densidade de pulso

### 7.1.3 DEFINIÇÃO DE PERIGO, AMEAÇA E RISCO

É importante definir os seguintes conceitos de forma clara, para que em uma avaliação de risco consiga-se alcançar uma clareza e objetividade maior <sup>[10]</sup>.

- ◆ Perigo: é uma condição ou evento em que há um risco inaceitável de ocorrência de danos;
- ◆ Ameaça: refere-se a possibilidade de dano ou uma perturbação para a saúde, sem requisitos específicos para o seu grau ou probabilidade; e
- ◆ Risco: entende-se pela probabilidade e a gravidade de uma ameaça passível de danos.

Estas definições também são definidas em demandas específicas de regulamentação (por exemplo, limites, dimensões, etc.), a caracterização desse limite de risco e a necessidade de ação é dada por <sup>[10]</sup>:

- ◆ Risco limite: Maior risco aceitável; e
- ◆ Risco residual: Risco residual após as medidas de proteção ao trabalho estejam em vigor.

### 7.1.4 VISÃO GERAL DOS FATORES DE AMEAÇA

Deve-se tomar sempre atenção a todas ameaças tanto decorrentes do aparelho laser quanto da rotina de trabalho em questão, de forma a sempre evitar qualquer tipo de ameaça. Nos seguintes pontos são listados ameaças em cada uma das esferas do ambiente de trabalho <sup>[10]</sup>.

- ◆ Ameaças mecânicas
  - Peças da máquina desprotegidas que estão em movimento;
  - Peças com superfícies perigosas;

- Movimento de transporte de equipamento;
- Partes móveis não controladas;
- Queda, escorregar, tropeçar ou torcer;
- Bater;
- ◆ Ameaças elétricas
  - Choques elétricos;
  - Arcos;
  - Cargas eletrostáticas;
- ◆ Substâncias Perigosas
  - Contato de pele com substâncias perigosas (sólidos, líquidos de trabalho húmido);
  - Inalação de substâncias perigosas (incluindo vapores, névoas, poeiras, fumaça);
  - Engolir substâncias perigosas;
  - Riscos químico-físicos (por exemplo, incêndio, ameaças de explosões, reações químicas não-controladas);
- ◆ Agentes biológicos
  - Riscos de infecções por microorganismos patogênicos (por exemplo, bactérias, vírus, fungos);
  - Efeitos sensibilizantes e tóxicos de microorganismos;
- ◆ Ameaças de incêndios e explosões
  - Sólidos inflamáveis, líquidos, gases;
  - Atmosfera explosiva;
  - Explosivos;
- ◆ Ameaças térmicas
  - Superfícies e meios quentes;
  - Superfícies e meios frios;
- ◆ Riscos devidos aos agentes físicos específicos
  - Ruído;

- Ultrasom, infrassom;
- Vibração de corpo inteiro;
- Vibração mão-braço;
- Radiação não-ionizante (por exemplo radiação infravermelha(IR), radiação ultravioleta (UR), radiação laser);
  - Radiação ionizante (Raios x, raios gamma, radiação de partículas (alfa, beta e radiação de nêutrons));
  - Campos eletromagnéticos;
  - Sob ou sobre pressão;
- ◆ Perigos causados por condições do ambiente de trabalho
  - Clima (por exemplo, calor, frio, ventilação inadequada);
  - Iluminação, luz;
  - Asfixia (por exemplo, pela redução da atmosfera de oxigênio), afogamento
    - Rotas de fugas e passagens inadequadas, sinalização de segurança e de saúde inadequados;
    - Movimento insuficiente na estação de trabalho, arranjo desfavorável do local de trabalho, pausas insuficientes e poucas instalações sanitárias;
- ◆ Tensão física/intensidade de trabalho
  - Dinâmica de trabalho pesado (por exemplo, movimentação manual de cargas);
  - Dinâmica de trabalho unilateral, movimento do corpo (por exemplo, movimentos repetitivos muitas vezes);
  - Trabalho de contabilidade (postura inábil);
  - Combinação de trabalho estático e dinâmico;
- ◆ Fatores físicos
  - Tarefa de trabalho projetadas inadequadamente (por exemplo vasta rotina de tarefas, super e subestimar qualificações)

- Organização de trabalho inadequadamente projetada (por exemplo trabalho sob longa duração de pressão e/ou longas horas de trabalho; rotinas noturnas frequentes, nenhuma rotina de trabalho intelectual, apenas físico);
- Condições sociais inadequadamente projetadas (por exemplo falta de contato social, lideranças desfavoráveis, conflitos)
- Ambiente e local de trabalho inadequadamente projetado (por exemplo ruído, clima, falta de espaço, percepção inadequada de sinais e das características de processos, design de software muito complicado)

◆ Outros perigos

- Através de pessoas (por exemplo acidentes)
- Através de animais (por exemplo mordidas)
- Através de plantas ou produtos vegetais (por exemplo efeitos sensibilizantes e tóxicos)

### 7.1.5 SUBSTITUIÇÃO

A substituição é resultado da avaliação de risco, que permite a verificação de possíveis usos de métodos de operação alternativos com menores riscos associados. Por exemplo, a substituição de laser de baixa potência, com outro comprimento de onda ou outro modo de operação, com a finalidade de diminuir os riscos <sup>[10]</sup>.

O resultado da prova de substituição deve ser registrada na documentação da avaliação de risco. A substituição pode ser usada para propósitos de projeção da máquina para quase todas as aplicações de laser de classe 1, 2, 1M ou 2M. Laser de classe 3R, 3B ou 4 constituem uma exceção. Uma substituição de laser de alta potência, por exemplo, em materiais de transformação, geralmente não é possível <sup>[10]</sup>.

### 7.1.6 *ESTADOS DE FUNCIONAMENTO*

Segundo a parte geral de TROS Radiação laser, o documento descreve os seguintes estados de funcionamento de um aparelho laser <sup>[18]</sup>:

- ◆ Operação Normal, sendo o funcionamento como previsto, uso correto; e
- ◆ Operação Normal em condições de funcionamento diferente, geralmente associado com risco mais elevado, por exemplo, manutenção, processos de configuração, testes, construção, desmantelamento.

Para cada um desses estados uma avaliação de risco separada deve ser efetuada.

### 7.1.7 *CUIDADOS DA SAÚDE OCUPACIONAL*

Para o trabalhador, operar em áreas com radiação laser, o regulamento sobre cuidados de saúde ocupacional (ArbMedVV) com relação à exposição não prevê a obrigação de ofertas de pensões. No entanto, há o direito de solicitar precauções.

Quanto a previdência o empregador deve proporcionar aos empregados, caso queiram, os exames regulares de medicina ocupacional de acordo com §11 da lei dos direitos de segurança trabalhista (ArbSchG). A menos que, de acordo com a avaliação de risco, as condições de trabalho e as medidas de proteção tomadas não prejudiquem a saúde <sup>[10]</sup>.





## 7.2 ESTRUTURA DA AVALIAÇÃO DE RISCO

### 7.2.1 *ESTAPAS DO PROCESSO DA AVALIAÇÃO DE RISCO*

Qualquer serviço relacionado ao uso de aparelhos laser apenas podem iniciar suas atividades após a elaboração da avaliação de risco e a implementação das medidas de proteção. Para a preparação da avaliação de risco deve ser levado em conta sempre o pior cenário possível de ser atingido durante a operação normal de um aparelho laser. Além do mais, deve ser feitas considerações sobre rotinas de manutenção e reparação do equipamento, levando em conta todos os riscos associados. Entre as etapas do processo de avaliação dos risco, pode-se listar <sup>[10]</sup>:

- ◆ 1. Definir a área de operação;
- ◆ 2. Identificar os perigos (diretos e indiretos);
- ◆ 3. Definir medidas específicas de saúde e segurança (nesse passo é respeitado a ordem das medidas de proteção encontrado no §4 da lei de proteção ao trabalhador);
- ◆ 4. Implementação das medidas;
- ◆ 5. Verificação da eficácia das medidas;
- ◆ 6. Atualização da avaliação de risco

Em relação aos locais de operações iguais porém independentes um do outro, os procedimentos de trabalho e as áreas de trabalho podem ter apenas uma vez os perigos analisados e julgados. Nos seguintes pontos serão abordados como seguir cada um destas etapas <sup>[10]</sup>.

### 7.2.2 AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÕES

O empregador pode ter as informações necessária do fabricante, do distribuidor dos equipamentos ou por outras fontes (trecho do OStrV). Especialmente as seguintes informações <sup>[10]</sup>:

- ◆ Informações sobre o desempenho
- ◆ Pulso de energia, frequência de repetição de pulso, duração de pulso
- ◆ Comprimento de onda
- ◆ Distância de segurança
- ◆ Classe de laser

Fabricantes, distribuidores e importadores se enquadram nos termos de Segurança Geral de Produtos (do alemão “*Produktsicherheitsgesetz, ProdSG*”). Por exemplo, produtos para o mercado alemão que se enquadram na lei de dispositivos médicos (*Medizinproduktegesetz, MPG*) são obrigados a fornecer documentos relevantes, que contém todas as informações necessárias para a operação segura do equipamento em questão. Sobre a lei de segurança do produtos lasers, o fabricante tem que atribuir a estes as classes de laser e criar uma análise de risco, onde mostrará os perigos associados ao aparelho <sup>[10]</sup>.

Em relação a aparelhos lasers encapsulados, exemplo de um aparelho encapsulado classe 1, devem apresentar uma avaliação de risco distinta pois em casos de manutenção ou trabalhos de reparação, a radiação laser antes encapsulada pode constituir ameaças de classes de laser superiores <sup>[10]</sup>.

### 7.2.3 IMPLEMENTAÇÃO

Na implementação da avaliação de risco, deve ser tomado atenção ao seguintes pontos <sup>[10]</sup>.

- ◆ Avaliação de todos os riscos que emanam da radiação laser;
- ◆ A determinação da natureza, extensão e duração da exposição;
- ◆ Verificar a conformidade com valores limites de exposição com condições de contorno;
- ◆ Examinar a disponibilidade de outras fontes de laser com menor exposição;
- ◆ Inclusão das conclusões da atenção a saúde ocupacional;
- ◆ Determinar as medidas de proteção;
- ◆ Exame de óculos de proteção laser e de ajuste do laser;
- ◆ Observância do impacto sobre a saúde e segurança para grupos de alto risco;
- ◆ Incluindo as especificações do fabricante para qualquer classe de laser e dados do feixe;
- ◆ Determinando a região de laser e marcações;
- ◆ Avaliando os riscos diretos, indiretos e medidas de proteção;
- ◆ Estabelece medidas de proteção (princípio TOP) em relação ao nível tecnológico;
- ◆ Consideração de projetos de lei de efeitos cambiais e de combinação.

#### 7.2.4 REAVALIAÇÃO

Implementação da avaliação de risco é composta pela avaliação inicial, sendo feita antes mesmo do local de trabalho ser feito ou montado. As razões para uma mudança de avaliação de risco pode ser, entre outras <sup>[10]</sup>:

- ◆ Comissionamento de novos componentes no ambiente de operação laser;
- ◆ Alterações nos regulamentos já existentes (OStrV e outros relacionados);
- ◆ Avanços na tecnologia, na saúde ocupacional e ergonomia (estudo científico das relações entre homem e máquina, visando segurança e eficiência);
- ◆ Notificações de incidentes no local de trabalho; e
- ◆ Recomendações do médico da empresa.

É recomendável verificar em intervalos regulares a avaliação de risco, mesmo que não haja nenhuma das situações acima descritas, de modo a sempre revisá-las [10].

#### 7.2.5 CONSIDERAÇÕES DE PESSOAS VULNERÁVEIS

Entre as pessoas que devem se ter considerações adicionais, estão [10]:

- ◆ Pessoas cuja pele está acima da média fotossensível. Há pessoas, cuja pele é mais sensível à radiação violeta e visível do que a média da população. Tal aumento pode ser devido a plantas ou doenças. A potência da sensibilidade da pele pode mudar ao longo da vida
- ◆ Pessoas com doenças pré-existentes nos olhos, cujas lentes dos olhos são turvos, apresentando um aumento de sensibilidade de claridade. Com danos seguintes, os olhos tem um aumentos do risco de restrição de toda a visão.
- ◆ Pessoas com doenças na pele, que já foram afetadas com câncer de pele, apresentam um risco aumentado de vir a desenvolver novamente a doença. Lesões de pele (mecânicos, queimaduras) podem levar a uma maior sensibilidade à radiação óptica.
- ◆ Indivíduos cuja lente cristalina natural fora substituída por uma lente artificial. Caso a lente artificial não coincida com a transmissão espectral da lente natural do olho, a retina pode estar particularmente em risco.
- ◆ Pessoas tomando medicamentos que possam aumentar a fotossensibilidade.

No que diz respeito a segurança e a saúde das crianças e adolescentes, as disposições da lei de proteção de jovens no trabalho (JArbSchG) e a portaria de proteção ao trabalhador infantil (KindArbSchV) devem ser consideradas. No que diz respeito à segurança e a saúde de mulheres grávidas e lactantes no trabalho, as

disposições da lei de proteção da maternidade (MuSchG) e o regulamento relativo a proteção das mães no trabalho (MuSchArbV) têm de ser considerados <sup>[10]</sup>.

### 7.2.6 DOCUMENTAÇÃO

Quanto a documentação da avaliação de risco, deve ser abordado os seguintes fatores<sup>[10]</sup>.

- ◆ Relatório escrito da avaliação de risco;
- ◆ Descrição do local de trabalho e da atividade;
- ◆ Considerações sobre a operação normal, reparação e manutenção;
- ◆ Especificação dos dados do laser;
  - Tipo de laser e classe
  - Comprimento de onda, raio do feixe, divergência
  - Poder e/ou pulso de energia, irradiância, exposição radiante
  - Tempo de exposição, duração de pulso, frequência de repetição do pulso
  - Distância de segurança (NOHD), área de laser

Em casos de serviços com laser UV, 30 anos é o tempo de armazenamento da avaliação.

Caso haja ambientes de trabalho iguais porém separados, tendo as mesmas características, mesmas condições de trabalho, mesmos modos de operação. É necessário apenas uma avaliação de risco de um dos ambientes <sup>[10]</sup>.

Um exemplo de uma avaliação de risco está localizada no apêndice E.

## 8 CAPÍTULO – TAREFAS E RESPONSABILIDADES DO TÉCNICO DE SEGURANÇA DE LASER NÍVEL 2



**[PERGUNTA: Deixar as “tarefas e responsabilidade do técnico” como um capítulo separado ou inserir dentro de Medidas de proteção organizacionais cap 6 ?]**

Até agora o trabalho abordou todos os campos da avaliação de risco (classes de laser, perigos e medidas de proteção e todos os demais conteúdos que compõem a avaliação de risco). Neste último capítulo do trabalho será abordado as tarefas e responsabilidades do técnico de segurança laser nível 2.

### 8.1 TAREFAS E RESPONSABILIDADES DO TÉCNICO DE SEGURANÇA LASER

De acordo com §5(2) OStrV o técnico responsável deve ser decretado por escrito, antes do início da operação do aparelho de laser de classe 3R, 3B e 4. A competência do técnico deve ser mostrada pela conclusão com êxito de um curso reconhecido. O empregador escolhe uma pessoa apta e o seleciona como técnico de segurança laser. Assim como a seleção do profissional, as tarefas e direitos do mesmo

devem ser claramente descritas. Por motivos de clareza foram separados questões mais importantes sobre este assunto e logo em seguida respondidas adiante <sup>[10]</sup>:

◆ Quem pode ser nomeado como um técnico de segurança laser

*O técnico de segurança laser deve ter concluído uma formação profissional técnica, científica ou cosmética (com a duração de 2 anos) e com experiência profissional de no mínimo 2 anos.*

◆ Os critérios para a seleção da proteção laser

*Técnicos de segurança laser nível 2 devem ter um bom conhecimento técnico, uma competência social alta e aceitação por seus colegas.*

◆ Apoio do empregador ao técnico de segurança laser

*Para que o técnico de segurança laser desempenhe seu papel adequadamente, ele requer o apoio dos empregadores. Isso deve reger as responsabilidades de forma clara e de forma a assegurar a necessária aceitação desta função importante pelos demais funcionários. O técnico de segurança laser deve ser envolvido em qualquer um dos processos internos e informado regularmente sobre quaisquer alterações.*

◆ Transmissão de deveres

*O empregador tem a opção de se valer de uma transferência de deveres para o técnico de segurança laser. Para transferir parte de suas responsabilidades para o técnico de segurança laser, as mudanças devem estar claramente especificadas e escritas. Por exemplo: avaliação de risco e formação de funcionários.*

◆ Conhecimento de proteção laser

*O técnico de proteção laser adquire suas experiências em centros de formação reconhecidos. Em seu histórico devem constar os seguintes assuntos:*

- *Bases das leis de proteção ao trabalhador, OStrV, regras técnicas da radiação laser, regulamentos de prevenção de acidentes, normas e regulamentos especiais para a proteção laser;*
- *Conhecimento de efeitos físicos e biológicos da radiação laser, classe de laser e limites de exposição;*
- *Efeitos diretos e indiretos causados pela radiação laser;*
- *Seleção, realização e monitoramento das medidas de proteção (princípio TOP);*
- *Direitos e deveres do técnico de proteção laser;*
- *Conteúdo e estrutura de treinamento de funcionários;*
- *Operação segura de dispositivos laser.*

#### ◆ *Tarefas do técnico de segurança laser*

*As tarefas do técnico de segurança laser no serviço são:*

- *Apoio do empregador ou da pessoa competente na preparação da avaliação de risco;*
- *Aplicação das condições estabelecidas nas medidas de proteção da avaliação de risco;*
- *Apoio ao empregador em relação a formação de profissionais;*
- *Controlar o funcionamento seguro dos equipamentos laser;*
- *Estreita cooperação com as pessoas qualificadas, como médicos da empresa, para uma maior e mais adequada segurança de trabalho.*

#### ◆ *Responsabilidade do técnico de proteção laser*



*O técnico de segurança laser é responsável pelas tarefas escritas no OStrV. De acordo com §7(2) é proibido agir de forma negligente e intencional contra o OStrV. É proibido agir de forma negligente.*

- *Agir de forma deliberada/intencionalmente significa agir com a intenção, de modo proposital, ter a certeza daquilo que se quer fazer;*
- *Negligente significa falta de cuidado, desleixo com a atividade;*
- *Se acidentes acontecerem e alguém se machucar ou até mesmo morrer, isso não será apenas uma infração e sim uma ofensa criminal.*

## 9 CAPÍTULO – CONCLUSÕES



É inquestionável os avanços que os lasers trouxeram, tanto no campo da medicina como da física. Porém qualquer avanço não pode ser aceitado sem ter, no mínimo, conhecimentos razoáveis sobre seus benefícios e malefícios. E isso se torna ainda mais necessário no campo da medicina, porque a tecnologia estará em contato direto com as pessoas, tornando-se uma questão de saúde pública.

A radiação óptica artificial está em diferentes setores e atividades, tanto no ramo industrial quanto no ramo médico. Na saúde é visível o uso, principalmente na odontologia e dermatologia e na industrial, em cortes e soldagens. Radiações ópticas artificiais podem causar inúmeros danos a pele e aos olhos, como visto no decorrer deste trabalho. Como abordado nos dois primeiros capítulos, a evolução dos laser continuam em alta, e conforme eles se tornam mais potentes, riscos mais graves estão associados a ele. Lasers mais potentes, de um lado é benéfico, por tornar processos mais rápidos, eficientes e conquistando mais aplicações, porém de outro maléfico, por causar danos mais graves e em menos tempo aos tecidos biológicos caso usados de maneira não correta. Portanto, há razões bem fundamentadas para que haja medidas que protejam todos os trabalhadores e que os mesmo sejam informados destes riscos.

A regulamentação deve servir como padronização da qualidade dos serviços que operam aparelhos lasers, evitando que a qualidade do serviço dependa particularmente da empresa e sim, dependa de leis que regularizem e fiscalizem por uma qualidade mínima de proteção aos seus trabalhadores. Requisitando, então, medidas de proteção técnicas, organizacionais e pessoais.

Com isso, torna-se visível a necessidade de um conjunto claro e eficiente de regras que protejam todos os trabalhadores brasileiros, os quais tenham suas atividades relacionadas direta ou indiretamente com aparelhos lasers.

## 10 CAPÍTULO – ANEXOS



### 10.1 ANEXO A – DECRETO PARA A PROTEÇÃO DOS TRABALHADORES CONTRA OS PERIGOS DA IRRADIAÇÃO ÓPTICA ARTIFIAL (DECRETO DOS TRABALHADORES RELACIONADO A IRRADIAÇÃO ÓPTICA ARTIFICIAL - OSTRV)

No anexo pode ser encontrado a tradução de um dos decretos mais importantes para este trabalho, justamente por desempenhar papel fundamental no conjunto de regras alemãs. O decreto aborda, de modo geral, as bases para a segurança laser.

# **Decreto para a proteção dos trabalhadores contra os perigos da irradiação óptica artificial (decreto dos trabalhadores relacionado a irradiação óptica artificial - OStrV)**

De 19 de Julho de 2010 (BGBl. I S. 960)

Leis e Decretos

**GV18**  
**OStrV**

Julho 2010

# Conteúdos

	Páginas
<b>Capítulo 1</b>	
Área de aplicações e definições	
§ 1          Área de aplicação .....	4
§ 2          Definições .....	4
<b>Capítulo 2</b>	
Apuramento e avaliação de perigos da irradiação óptica artificial; definições	
§ 3          Avaliação de riscos .....	6
§ 4          Medições e cálculos .....	7
§ 5          Pessoa especializada nível 2, técnico de proteção de laser .....	8
<b>Capítulo 3</b>	
Limites de exposição e medidas de proteção contra irradiações ópticas artificiais	
§ 6          Limites de exposição para irradiações ópticas artificiais .....	9
§ 7          Medidas para evitar e reduzir perigos dos empregados em relação a irradiação óptica artificial .....	9
<b>Capítulo 4</b>	
Instrução dos empregados sobre os perigos da irradiação óptica artificial	
§ 8          Instrução dos operários .....	11
§ 9          Consulta da comissão de segurança da empresa .....	11
<b>Capítulo 5</b>	
Exceções. Infrações e delitos	
§ 10        Exceções .....	12
§ 11        Infrações e delitos .....	12

# Capítulo 1

## Campo de aplicação e Definições

### § 1 Campo de aplicação

(1) Esse decreto é válido para operários relacionados ao trabalho contra reais e possíveis perigos da proteção de saúde e segurança contra a irradiação óptica de fontes artificiais. O decreto se refere especialmente aos perigos dos olhos e da pele.

(2) Esse decreto não é válido nas empresas que estão sujeitas na lei de exploração de minas .... (Não traduzido)

(3) Ministério de guerra pode pedir exceções deste decreto ... (não traduzido)

### § 2 Definições

(1) Radiação óptica é qualquer radiação eletromagnética de comprimento de onda de 100 nanômetro até 1 milímetro. O espectro de radiação óptica é dividido em espectro ultravioleta, espectro visível e espectro infravermelho.

1. Radiação ultravioleta é a radiação de comprimento de onda de 100 nanômetro até 400 nanômetros (radiação UV); o espectro de radiação UV é dividido em radiação UV-A (315 até 400 nanômetros), radiação UV-B (280 até 315 nanômetros) e radiação UV-C (100 até 280 nanômetros);

2. Radiação visível é a radiação óptica de comprimento de onda de 380 até 780 nanômetros;

3. Radiação infravermelha é a radiação de comprimento de onda de 780 nanômetros até 1 milímetro (radiação IV); o espectro da radiação IV é dividido em radiação IV-A (780 até 1 400 nanômetros), radiação IV-B (1 400 até 3 000 nanômetros) e radiação IV-C (3 000 nanômetros até 1 milímetro).

(2) Radiação óptica artificial no sentido deste decreto é qualquer radiação óptica que sai de fontes artificiais.

(3) Radiação laser é a radiação óptica coerente produzida por um laser. Laser são aparelhos de instalações para produzir ou ampliar da radiação óptica artificial.

(4) A radiação óptica artificial incoerente é cada radiação óptica artificial exceto radiação laser.

(5) Limites de exposição são valores máximos da exposição dos olhos ou da pele em relação a irradiação óptica artificial.

(6) Intensidade ou densidade de potência é a potência por unidade de área incidente em uma área expressa em Watt por metro quadrado ( $\text{W/m}^2$ ).

(7) Dose ou densidade de energia é a energia por unidade de área incidente em uma área expressa em Joule por metro quadrado ( $\text{J/m}^2$ ).

(8) Densidade de radiação é o fluxo ou potência de radiação por unidade de ângulo sólido e de área expresso em Watt por metro quadrado por esferorradiano ( $\text{W/m}^2/\text{Sr}$ )

(9) Grau de risco é a ação combinada de intensidade, dose e densidade de radiação óptica artificial que age sobre os operários.

(10) O nível tecnológico é o nível de desenvolvimento de processos, equipamentos e modos de operação presentes na prática de uma medida para proteger a saúde e a segurança dos operários. Ao determinar o nível tecnológico leva-se em consideração processos, meios e métodos de operação que tenham sido experimentados na prática com sucesso. O mesmo se aplica aos requisitos de saúde e higiene ocupacional.

(11) Os alunos (as), estudantes em estabelecimentos de ensino, que são expostos a radiação óptica artificial durante suas atividades, são semelhantes a operários.

## Capítulo 2

### Investigação e avaliação de perigo da radiação óptica artificial; Medições



### **§ 3                    Avaliação de risco**

(1) Na análise de condições de trabalho conforme a lei de proteção ao trabalhador/operário, o empregador verifica se radiação óptica artificial apresenta-se no local de trabalho dos operários, se for o caso ele deve avaliar todos os perigos resultantes contra a saúde e segurança dos operários. Ele deve determinar e avaliar a exposição resultante no local de trabalho. Para os operários o perigo em cada caso existe se os limites de exposição de acordo com o parágrafo seis (§6) são superados. O empregador pode arranjar as informações necessárias do fabricante ou fornecedor do equipamentos ou de outras fontes disponíveis. Caso não seja possível constatar se os limites de exposição com o parágrafo seis (§6) são respeitados, ele deve investigar a magnitude da exposição através de cálculos ou medições de acordo com o parágrafo quatro (§4). De acordo com o resultado da avaliação de risco o empregador deve definir medidas de proteção de acordo com o nível tecnológico.

(2) A avaliação de risco deve respeitar, de acordo com parágrafo um (§1), os seguintes pontos:

1.        A maneira, o tamanho e a duração da exposição da radiação óptica artificial,
2.        Região de comprimento de onda da radiação óptica artificial,
3.        Os limites de exposição do parágrafo seis (§6),
4.        Todas consequências na saúde e segurança dos operários que pertencem a um grupo de risco especial,
5.        Todas consequências na saúde e segurança dos operários que podem resultar na ação da radiação óptica artificial e substâncias químicas fotossensíveis no local de trabalho,
6.        Todas consequências indiretas na segurança e na saúde dos operários, por exemplo através de cegueira, perigo de queimaduras gerais e explosão,
7.        A disponibilidade e possibilidade de usar a aplicação no meio de trabalho e nas instalações de modo a resultar em uma menor exposição dos operários (examinação de substituição),
8.        Conhecimentos que resultam da examinação preventiva da medicina do trabalhador e informações gerais e publicadas,
9.        A exposição dos operários a radiação óptica artificial de diversas fontes,
10.      Os dados dos fabricantes sobre fontes de radiação óptica e outros meio de trabalho,

11. Os dados dos fabricantes dos aparelhos de lasers e se for o caso dos lasers usados nos aparelhos de lasers conforme o nível tecnológico,

12. A classificação das fontes de radiação óptica incoerente, dos níveis de tecnologia, que tem perigo semelhante como nos lasers da classe 3A, 3B e 4.

13. As condições do lugar de trabalho e as condições que existem por exemplo, no uso normal dos processos de ajuste e nos trabalhos de manutenção e conserto.

(3) Antes do início da rotina de trabalho, o empregador tem que fazer uma avaliação de risco e dos meios de proteção necessários. A avaliação de risco deve ser testada e atualizada, especialmente se houver mudanças nas condições ou no local de trabalho. As medidas de proteção devem ser adaptadas também.

(4) O empregador tem que documentar a avaliação de risco independentemente do número de operários antes da rotina de trabalho, de uma forma que possibilite uma leitura posterior. A documentação deve descrever os perigos que podem acontecer no local de trabalho e que medidas deve ser tomadas a fim de evitar e minimizar os perigos aos operários. O empregador deve arquivar os resultados das medidas de cálculo de uma forma que possibilite a leitura posterior. No caso de exposição acidental de irradiação óptica artificial ultravioleta, a informação deve ser arquivada por 30 anos.

#### **§ 4 Medições e cálculos**

(1) O empregador deve assegurar que medidas e cálculos sejam planejados e executados de acordo com o nível tecnológico. Isso requer métodos de medição e equipamentos, bem como qualquer método de cálculo necessário:

1. Eles devem ser adaptados as condições do lugar de trabalho e as condições das exposições com respeito a radiação óptica artificial e

2. Eles devem ser aptos para determinar matematicamente as condições físicas. Os resultados das medições devem permitir a decisão se os limites de exposição do parágrafo seis (§6) são respeitados.

(2) As medições a fazer podem consistir de amostrar aleatórias.

#### **§ 5 Pessoas especializadas nível 2, técnico de proteção de laser**

(1) O empregador deve assegurar que a avaliação de risco, as medidas e cálculos são executados por pessoas especializadas nível 2. Se o empregador não tem conhecimentos específicos, ele deve consultar um especialista.

(2) Antes do primeiro uso o laser das classes 3A, 3B e 4, o empregador deve determinar por escrito um técnico de proteção de laser. A especialização nível 1 deve ser feita participando de um curso correspondente. O técnico de proteção de laser tem as seguintes tarefas:

1. Ajudar o empregador na execução de medidas de proteção necessárias, parágrafo três (§3), ponto um (1), sétima frase (7ª);
2. A supervisão do uso seguro de laser encontra-se na primeira frase (1ª).

No desempenho das suas funções, o técnico de proteção de laser trabalha com o especialista e o médico especialista da empresa em conjunto para a segurança no trabalho.

## Capítulo 3

### Limites de exposição e medidas de proteção contra radiação óptica artificial

#### § 5 Limites de exposição para irradiação óptica artificial

- (1) O limite de exposição para a irradiação óptica artificial incoerente...

**(PERGUNTA: TRADUZIR O RESTANTE? )**

## 10.2 ANEXO B – FÓRMULÁRIO DE CONTRATAÇÃO DE UM TÉCNICO DE SEGURANÇA LASER NÍVEL 2

**[PERGUNTA: Devo traduzir o formulário?]**

## Bestellung zum Laserschutzbeauftragten

- gemäß § 5 Abs.2 OStrV
- gemäß § 6 BGV B2

Herr/Frau \_\_\_\_\_

wird ab dem \_\_\_\_\_ für den Bereich / Betrieb \_\_\_\_\_

gemäß § 5 Abs. 2 der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) zum Laserschutzbeauftragten bestellt.

### Aufgaben

#### *Unterstützung des Arbeitgebers bei der Durchführung der Schutzmaßnahmen*

- Mitwirkung bei der Durchführung und Umsetzung der in der Gefährdungsbeurteilung
- festgelegten Maßnahmen
- Mitwirkung bei der Unterweisung
- Erstellen von Betriebsanweisungen
- Organisation der arbeitsmedizinischen Vorsorge und Beratung zur medizinischen
- Versorgung bei Augenunfällen

#### *Überwachung des sicheren Betriebs von Lasern*

- Mitwirkung bei der Inbetriebnahme von Lasereinrichtungen
- Motivation von Beschäftigten
- Regelmäßige Überprüfung und Dokumentation der Wirksamkeit der getroffenen
- Schutzmaßnahmen
- Melden von Mängeln
- Mitwirkung bei der Prüfung von Lasereinrichtungen und persönlicher
- Schutzausrüstung
- Organisation von Wartungsarbeiten – Zusammenarbeit mit Fremdfirmen

#### *Enge Zusammenarbeit mit Sicherheitsfachkraft und Betriebsarzt*

### Anmerkung:

- **Pflichtübertragung**
- **Zusätzliche Aufgaben des Laserschutzbeauftragten durch weitere Pflichtenübertragung gemäß § 13 „Grundsätze der Prävention“ (BGV A 1) mit Weisungsbefugnissen und Verantwortung für den Betrieb von Laseranlagen:**
  - Abstellen von Mängeln, gegebenenfalls Stillsetzen der Laseranlagen
  - Veranlassung von ärztlichen Untersuchungen bei vermuteten Laserunfällen

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des  
Laserschutzbeauftragten

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des  
Arbeitgebers

## 10.3 ANEXO C – INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃO

Neste apêndice se encontra um exemplo da sinalização das instruções de operação. As quais devem ficar visivelmente expostas a todos os trabalhadores relacionados a operação laser

Firma:

**Muster- Betriebsanweisung  
für Laser-Einrichtungen**

Nummer:  
Werkstatt:

1. Anwendungsbereich

**Laser-Schweißanlagen**

2. Gefahren für Mensch und Umwelt



- Laserstrahlung
- Brand (z. B. Funkenflug, Sekundärflamme)
- Schadstoffe (Gase, Dämpfe, Rauch/Stäube)
- Lärm
- Elektrische Gefährdung

3. Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln



- Beseitigen der Brand- und ggf. Explosionsgefahr
- Lüftung (natürliche: Fenster, Türen, Tore; maschinelle: Ventilatoren)
- Absaugung im Entstehungsbereich bei Laserschweißarbeiten
- Auswahl möglichst lärmarmer Verfahren/Geräte. Persönlicher Gehörschutz über 80 dB(A)
- Persönliche Schutzausrüstung, Verwendung von Laser-Schutzbrillen nach EN 207

4. Verhalten bei Störungen und im Gefahrfall

Notruf:

- Reparaturen der Laseranlage nur von einer Elektrofachkraft durchführen lassen
- Sonstige Störungen nur von Fachpersonal (eingewiesene Person) beseitigen lassen
- Störungen dem Aufsichtsführenden - melden

5. Verhalten bei Unfällen – Erste Hilfe

Notruf:



- Maschine abschalten
- Ersthelfer und Aufsichtsführende informieren
- Verletzten betreuen
- Augenarzt/Klinik:



6. Instandhaltung, Entsorgung

1. Alle Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten müssen bei ausgeschalteter Laserquelle in elektrisch spannungsfreiem Zustand durchgeführt werden. Wartungsarbeiten sowie einfache Reparaturen darf nur ein Unterwiesener durchführen
2. Schäden an der Maschine dürfen nur von den beauftragten Personen beseitigt werden
3. Für die Instandhaltung ist zuständig: \_\_\_\_\_

Datum:

Unterschrift:

## 10.4 ANEXO D – TABELAS DE CÁLCULOS

Neste anexo consta todas as tabelas usadas neste trabalho para os cálculos feitos. As primeiras duas tabelas estão as informações necessárias para o cálculo do óculos de proteção laser. Já as demais tabelas estão relacionadas com os limites de radiação óptica, tanto para tecidos quanto para olhos.



**Tabela D.1** [26]

Tabela 6 para BGI 5092 / Faixas de Utilização e Transmitância Espectral do laser - Óculos Adequado										
Grau de Proteção	Transmissividade espectral máxima no comprimento de onda do laser $\tau(\lambda)$	Potências - (E) respectivamente. Densidade de energia (H) para examinar o efeito de proteção e resistência contra radiação de laser em uma faixa de								
		180 nm até 315 nm			> 315 nm até 1400 nm			> 1400 nm até 1000 $\mu\text{m}$		
		Para teste de condição / duração de impulso em segundos (s)								
		D $\geq 310^4$	I, R $10^{-9}$ até $3.10^4$	M $< 10^{-9}$	D $> 5.10^{-4}$	I, R $10^{-9}$ até $5.10^{-4}$	M $< 10^{-9}$	D $> 0,1$	I, R $10^{-9}$ até 0,1	M $< 10^{-9}$
		$E_D$ W / m <sup>2</sup>	$H_{I, R}$ J / m <sup>2</sup>	$E_M$ W / m <sup>2</sup>	$E_D$ W / m <sup>2</sup>	$H_{I, R}$ J / m <sup>2</sup>	$H_M$ J / m <sup>2</sup>	$E_D$ W / m <sup>2</sup>	$H_{I, R}$ J / m <sup>2</sup>	$E_M$ W / m <sup>2</sup>
LB1	$1.10^{-1}$	0,01	$3.10^2$	$3.10^{11}$	$10^2$	0,05	$1,5.10^{-3}$	$10^4$	$10^3$	$10^{12}$
LB2	$1.10^{-2}$	0,1	$3.10^3$	$3.10^{12}$	$10^3$	0,5	$1,5.10^{-2}$	$10^5$	$10^4$	$10^{13}$
LB3	$1.10^{-3}$	1	$3.10^4$	$3.10^{13}$	$10^4$	5	0,15	$10^6$	$10^5$	$10^{14}$
LB4	$1.10^{-4}$	10	$3.10^5$	$3.10^{14}$	$10^5$	50	1,5	$10^7$	$10^6$	$10^{15}$
LB5	$1.10^{-5}$	$1.10^2$	$3.10^6$	$3.10^{15}$	$10^6$	$5.10^2$	15	$10^8$	$10^7$	$10^{16}$
LB6	$1.10^{-6}$	$1.10^3$	$3.10^7$	$3.10^{16}$	$10^7$	$5.10^3$	$1,5.10^2$	$10^9$	$10^8$	$10^{17}$
LB7	$1.10^{-7}$	$1.10^4$	$3.10^8$	$3.10^{17}$	$10^8$	$5.10^4$	$1,5.10^3$	$10^{10}$	$10^9$	$10^{18}$
LB8	$1.10^{-8}$	$1.10^5$	$3.10^9$	$3.10^{18}$	$10^9$	$5.10^5$	$1,5.10^4$	$10^{11}$	$10^{10}$	$10^{19}$
LB9	$1.10^{-9}$	$1.10^6$	$3.10^{10}$	$3.10^{19}$	$10^{10}$	$5.10^6$	$1,5.10^5$	$10^{12}$	$10^{11}$	$10^{20}$
LB10	$1.10^{-10}$	$1.10^7$	$3.10^{11}$	$3.10^{20}$	$10^{11}$	$5.10^7$	$1,5.10^6$	$10^{13}$	$10^{12}$	$10^{21}$
Os significados dos símbolos D, I, R e M são descritos no capítulo 6										

**Tabela D.2** <sup>[26]</sup>

**Tabela 3 para BGI 5092 / Transmitância Espectral do laser - Óculos de Proteção e Energia Associada e Densidade de Potência**

<b>Grau de Proteção</b>	<b>Potência máxima de laser de onda contínua com base de tempo de 0,25 s</b>	<b>Potência máxima de laser de onda contínua para observação até 2 s</b>	<b>Energia máxima para lases de pulso com base de tempo de 0,25 s</b>	<b>Energia máxima de observação do laser de pulso para 2 s</b>	<b>Região de Transmitância Espectral</b>
R1	10 mW	0,6 até 6 mW	$2 \cdot 10^{-6}$ J	$1,2 \cdot 10^{-6}$ J	$10^{-1}$ até $10^{-2}$
R2	100 mW	60 mW	$2 \cdot 10^{-5}$ J	$1,2 \cdot 10^{-5}$ J	$10^{-2}$ até $10^{-3}$
R3	1 W	600 mW	$2 \cdot 10^{-4}$ J	$1,2 \cdot 10^{-4}$ J	$10^{-3}$ até $10^{-4}$
R4	10 W	6 W	$2 \cdot 10^{-3}$ J	$1,2 \cdot 10^{-3}$ J	$10^{-4}$ até $10^{-5}$
R5	100 W	60 W	$2 \cdot 10^{-2}$ J	$1,2 \cdot 10^{-2}$ J	$10^{-5}$ até $10^{-6}$

**Tabela D.3** <sup>[20]</sup>

Comprimento de Onda $\lambda/\text{nm}$ (ver a)		Diâmetro de abertura de medição D	Tempo de exposição t/s							
			$10^{-13} - 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8.10^{-5}$	$1,8.10^{-5} - 5.10^{-5}$	$5.10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10$	
UV-C	$100^{(1)} - 280$	1 mm para $t \leq 0,35\text{s}$ ; $1,5.t^{0,375}$ mm para $0,35\text{s} < t < 10\text{s}$	$E = 3.10^{10} \text{ W.m}^{-2}$	$H = 30 \text{ J.m}^{-2}$						
UV-B	280 - 302			$H = 40 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 2,6.10^{-9} \text{ s}$						
	303			$H = 60 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 1,3.10^{-8} \text{ s}$						
	304			$H = 100 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 1,0.10^{-7} \text{ s}$						
	305			$H = 160 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 6,7.10^{-7} \text{ s}$						
	306			$H = 250 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 4,0.10^{-6} \text{ s}$						
	307			$H = 400 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 2,6.10^{-5} \text{ s}$					válido $H = 5,6.10^3.t^{0,25} \text{ J.m}^{-2}$	
	308			$H = 630 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 1,6.10^{-4} \text{ s}$						
	309			$H = 1000 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 1,0.10^{-3} \text{ s}$						
	310			$H = 1,6.10^3 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 6,7.10^{-3} \text{ s}$						
	311			$H = 2,5.10^3 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 4,0.10^{-2} \text{ s}$						
	312			$H = 4,0.10^3 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 2,6.10^{-1} \text{ s}$						
	313			$H = 6,3.10^3 \text{ J.m}^{-2};$ para $t < 1,6 \text{ s}$						
	314			$H = 5,6.10^3.t^{0,25} \text{ J.m}^{-2}$						
UV-A	315 - 400					$H = 5,6.10^3.t^{0,25} \text{ J.m}^{-2}$				

**Tabela D.4** <sup>[20]</sup>

Limites de Exposição para Efeito da Radiação Laser nos Olhos - Curto Tempo de Exposição (t < 10s) - Continuação								
Comprimento de Onda λ/nm (ver a)		Diâmetro de abertura de medição D	Tempo de exposição t/s					
			10 <sup>-13</sup> - 10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-11</sup> - 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup> - 1,8.10 <sup>-5</sup>	1,8.10 <sup>-5</sup> - 5.10 <sup>-5</sup>	5.10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-3</sup>
Visível e IR-A	400 - 700	7 mm	H = 1,5.10 <sup>-4</sup> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	H = 2,7.10 <sup>4</sup> .t <sup>0,75</sup> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	H = 5.10 <sup>-3</sup> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>		H = 18.t <sup>0,75</sup> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	
	700 - 1050		H = 1,5.10 <sup>-4</sup> .C <sub>A</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	H = 2,7.10 <sup>4</sup> .t <sup>0,75</sup> .C <sub>A</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	H = 5.10 <sup>-3</sup> .C <sub>A</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>		H = 18.t <sup>0,75</sup> .C <sub>A</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	
	1050 - 1400		H = 1,5.10 <sup>-4</sup> .C <sub>C</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	H = 2,7.10 <sup>5</sup> .t <sup>0,75</sup> .C <sub>C</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>	H = 5.10 <sup>-2</sup> .C <sub>C</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>			H = 90.t <sup>0,75</sup> .C <sub>C</sub> .C <sub>E</sub> J.m <sup>-2</sup>
IR-B e IR-C	1400 - 1500	ver C	E = 10 <sup>12</sup> W.m <sup>-2</sup>		H = 10 <sup>-3</sup> J.m <sup>-2</sup>			H = 5,6.10 <sup>3</sup> .t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>
	1500 - 1800		E = 10 <sup>13</sup> W.m <sup>-2</sup>		H = 10 <sup>4</sup> J.m <sup>-2</sup>			
	1800 - 2600		E = 10 <sup>12</sup> W.m <sup>-2</sup>		H = 10 <sup>3</sup> J.m <sup>-2</sup>			H = 5,6.10 <sup>3</sup> .t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>
	2600 - 10 <sup>6</sup>		E = 10 <sup>11</sup> W.m <sup>-2</sup>		h = 100 J.m <sup>-2</sup>	H = 5,6.10 <sup>3</sup> .t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>		
(anotações não traduzidas)								

Tabela D.5 [20]

**Limites de Exposição para Efeito da Radiação Laser nos Olhos - Longo Tempo de Exposição ( $t \geq 10s$ )**

Comprimento de Onda $\lambda/nm$ (ver a)		Diâmetro de abertura de medição D / mm	Tempo de exposição t/s		
			$10 - 10^2$	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 3.10^4$
UV-C	$100^{1)} - 280$	3,5		30	
UV-B	280 - 302			30	
	303			40	
	304			60	
	305			100	
	306			160	
	307			250	
	308		H =	400	J.m <sup>-2</sup>
	309			630	
	310			1000	
	311			1600	
	312			2500	
	313			4000	
	314			6300	
UV-A	315 - 400			10000	

**Tabela D.6** <sup>[20]</sup>

Limites de Exposição para Efeito da Radiação Laser nos Olhos - Longo Tempo de Exposição (t ≥ 10s) - Continuação					
Comprimento de Onda λ/nm (ver a)		Diâmetro de abertura de medição D / mm	Tempo de exposição t/s		
			10 - 10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> - 3.10 <sup>4</sup>
Visível	400 - 600 Lesão de retina fotoquímica (ver b)	7	H = 100.C <sub>B</sub> J.m <sup>-2</sup> ; γ = 11 mrad (ver c)	H = 1.C <sub>B</sub> W.m <sup>-2</sup> ; γ = 1,1.t <sup>0,5</sup> mrad (ver c)	H = 1.C <sub>B</sub> W.m <sup>-2</sup> ; γ = 110 mrad (ver c)
	400 - 700 Lesão de retina térmica (ver b)		α <= <sup>2)</sup> 1,5 mrad α > 1,5 mrad e t<=T2 α > 1,5 mrad e t>T2 E = 10 W.m-2 H = 10.C <sub>E</sub> .t0,75 J.m <sup>-2</sup> E = 18.C <sub>E</sub> .T <sub>2</sub> <sup>-0,25</sup> W.m <sup>-2</sup>		
IR-A	700 - 1400		α <= <sup>3)</sup> 1,5 mrad α > 1,5 mrad e t<=T2 α > 1,5 mrad e t>T2 E = 10.C <sub>A</sub> .C <sub>C</sub> W.m <sup>-2</sup> H = 18.C <sub>A</sub> .C <sub>C</sub> .C <sub>E</sub> .t <sup>0,75</sup> J.m <sup>-2</sup> E = 10.C <sub>A</sub> .C <sub>C</sub> .C <sub>E</sub> .T <sub>2</sub> <sup>-0,25</sup> W.m <sup>-2</sup> (máximo 1000 W.m <sup>-2</sup> )		
IR-B e	1400 - 10 <sup>5</sup>	3,5	E = 1000 W.m <sup>-2</sup>		
IR-C	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>	11			
anotações não traduzidas					

**Tabela D.7** [20]

Limites de Exposição da Radiação Laser na Pele								
Comprimento de Onda $\lambda$ /nm (ver a)		Diâmetro de abertura de medição D	Tempo de exposição t/s					
			$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10$	$10 - 10^3$	$10^3 - 3.10^4$
UV (A ,B, C)	100 - 400	3,5 mm	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ W.m}^{-2}$	Mesmos limites de valores para exposição aos olhos				
Vísível e IR-A	400 - 700		$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ W.m}^{-2}$	$H = 200.C_A \text{ J.m}^{-2}$	$H = 1,1.10^4.C_A.t^{0,25} \text{ J.m}^{-2}$	$H = 2.10^3.C_A \text{ W.m}^{-2}$		
	700 - 1400		$E = 2 \cdot 10^{11}.C_A \text{ W.m}^{-2}$					
IR-B e IR-C	1400 - 1500		$E = 10^{12} \text{ W.m}^{-2}$	Mesmos limites de valores para exposição aos olhos (ver b)				
	1500 - 1800		$E = 10^{13} \text{ W.m}^{-2}$					
	1800 - 2600		$E = 10^{12} \text{ W.m}^{-2}$					
	2600 - $10^6$		$E = 10^{11} \text{ W.m}^{-2}$					
anotações não traduzidas								

Tabela D.8 [20]

Fatores de Correção e Outros Parâmetros de Cálculo		
Parâmetro	Faixa Espectral Válida $\lambda/\text{nm}$	Valor
$C_A$	$< 700$	1
	700 - 1050	$10^{0,002(\lambda - 700)}$
	1050 - 1400	5
$C_B$	400 - 450	1
	450 - 600	$10^{0,02(\lambda - 450)}$
$C_C$	700 - 1150	1
	1150 - 1200	$10^{0,018(\lambda - 1150)}$
	1200 - 1400	8
$T_1$	$< 450$	10 s
	450 - 500	$10 \cdot 10^{0,02 \cdot (\lambda - 450)} \text{ s}$
	$> 500$	100 s

Parâmetro	Efeito Biológico	Valor
$\alpha_{\text{MIN}}$	Todos efeitos térmicos	1,5 mrad

Parâmetro	Extensão Angular / mrad	Valor
$C_E$	$\alpha_{\text{MIN}}$	1
	$\alpha_{\text{MIN}} < \alpha \leq 100$	$\alpha / \alpha_{\text{min}}$
	$\alpha > 100$	$\alpha_{\text{máx}} / \alpha_{\text{mín}}$ com $\alpha_{\text{máx}} = 100 \text{ mrad}$
$T_2$	$\alpha \leq 1,5$	10 s
	$1,5 < \alpha \leq 100$	$10 \cdot 10^{[(\alpha - 1,5)/98,5]} \text{ s}$
	$\alpha > 100$	100 s

Parâmetros	Tempo de Exposição t/s	Valor / mrad
$\gamma_P$	$t \leq 100$	11
	$100 < t \leq 10^4$	$1,1 \cdot t^{0,5}$
	$t > 10^4$	110



## 10.5 ANEXO E – EXEMPLO DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Como um dos objetivos principais deste trabalho foi a elaboração da avaliação de risco, este anexo apresenta como é este na prática. Este exemplo se trata de uma firma de restauração e abrange todos os pontos comentados ao longo até agora.

**Avaliação de risco da radiação laser de acordo com as  
regulações de funcionamento da restauração de lasers  
LT300 (Sala A207)**

Firma de Restauração

Hauptstr. 24

12105 Berlin

Gerente / Administrador(a): Anne M.

Na avaliação de risco foram envolvidas as seguintes pessoas:

Susanne S., Técnico de segurança de laser

Frank M., Representante

Regina H., Pessoa especializada em segurança

Documentado por:

Susanne S.

Berlin, 30.7.2015

---

Gerente / Administrador (a)

A avaliação de risco foi baseada na Lei de Condição de Trabalho, o regulamento relativo à proteção dos trabalhadores contra as radiações ópticas artificiais (OStrV), o regulamento técnicos da radiação laser (TROS) e a diretiva europeia EU de 2006/25/EG

## **Literatura**

ArbSchG                      Lei de proteção ao trabalhador

BetrSichV                    Regulamento de Operação de Segurança

Diretriz 2006/25/EG do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril de 2006, relativa a proteção da saúde e segurança dos trabalhadores contra os riscos resultantes de radiações artificiais ópticas

Regulamento para a proteção dos funcionários frente os perigos da radiação óptica artificial (regulamento de proteção ao trabalhador em relação a radiação óptica artificial – OstrV)

Regras técnicas para regulamentos da radiação óptica artificial (TROS), TROS radiação laser

Guia não vinculativo na diretiva 2006/25/CE sobre radiações ópticas artificiais.

BGV B2                      Regulação de prevenção de acidentes002E

BGR 192                    Uso de proteção em olhos e rosto.

BGI 5092                    Seleção e uso do óculos de proteção laser e de ajuste.

BGI 5031                    Sistema de comunicação de fibra óptica (LWLKS).

DIN EN 60825-1            Segurança da classificação dos equipamentos laser, requisitos e políticas de usuário.

DIN EN 207                Filtro e proteções para os olhos contra a radiação laser.

DIN EN 208                Óculos de proteção para trabalhos de ajuste sobre lasers e sistemas lasers.

### **Descrição das áreas de trabalho com laser:**

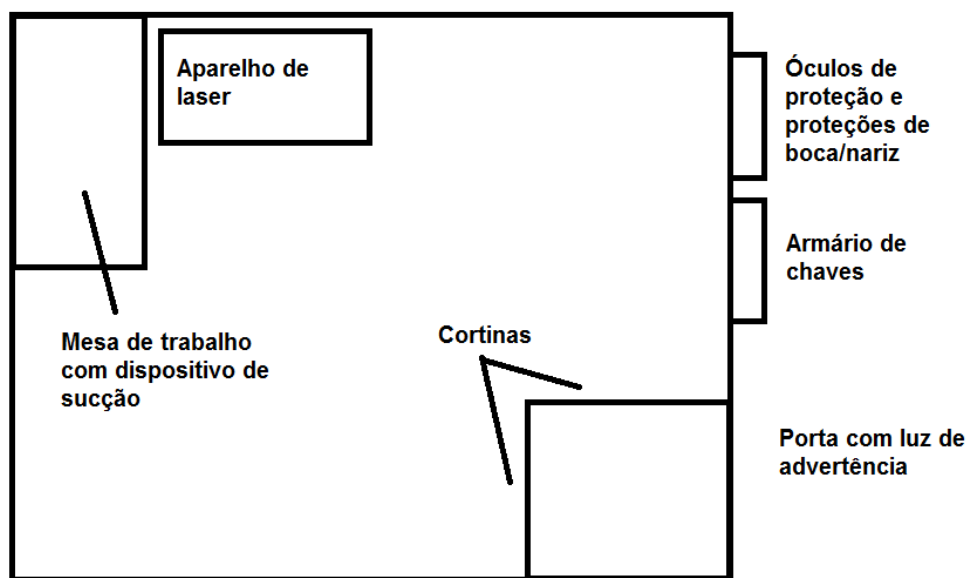
O dispositivo de laser da firma Soliton está na sala A 207 (Prédio 2, 1º andar) está em posição fixa. O aparelho laser é uma Nd:YAG (Tabela 1), o qual é utilizado para a limpeza suave de objetos valiosos. Estes são normalmente feitos de pedra, bronze ou madeira.

A potência média deste laser classe 4 é de 10W. O feixe é guiado para a superfície de utensílios. Quando usado o laser na superfície desses objetos, o laser penetra uma camada superficial (na gama de alguns  $\mu\text{m}$ ) a qual é evaporada, limpando o objeto.

O feixe do laser Nd:YAG emite radiação na gama IR-A e não visível. Por isso o laser não possui feixe visível, o qual tem as mesmas condições geométricas que o lasers de Nd:YAG. A área será marcada antes e depois da aplicação

O trabalhador usa um óculo de proteção laser e uma máscara com proteção de inalação, a qual é fornecida pelo fabricante. A figura 1 mostra um esboço da sala de do aparelho laser. Toda a área é designada como espaço de laser. A porte é protegido através de um código numérico contra o acesso não autorizado a partir do exterior da sala. Há sinais de advertência de laser e luz de advertência laser, indicando o funcionamento do laser. Na porta há uma cortina para o bloqueio do laser. Dentro da sala há os óculos de segurança laser.

Condições espaciais:



Esboço da área de laser da sala A207.

## Especificações técnicas

Fabricante	Soliton Nd:YAG Sistema de limpeza de laser
Tipo de laser	Laser pulsado Nd-YAG para restauração Designação: LT300
Classe de laser	4
Comprimento de onda (s)	1064 nm
Potência (cw-Laser)	-
Energia (Pulso)	0,33 J
Largura de pulso	8 ns
Frequência de repetição de pulso	30 Hz
Potência média $P_0$	10 W
Poder de pulso de pico $P_p$	$4,13 \cdot 10^7$ W
Menor relevante Diâmetro do feixe Diâmetro do feixe em 10cm de distância	Diâmetro do feixe ao sair da parte da mão 7,2 mm
Divergência do feixe	Ângulo de divergência completa 2 mrad
Máx. Irradância	$1,015 \cdot 10^{12}$ W/m <sup>2</sup>
Feixe de mira	Classe 2, < 1mW, 530 nm
Tempo de exposição	Típico 5 min
Limite de exposição	Olhos: 50 W/m <sup>2</sup> (refere-se a potência média, 5min) 1000 W/m <sup>2</sup> (refere-se a potência média, 1min)
NOHD	13823 m Distância de segurança para a pele é de 24,3 m

Tabela 1: Dados técnicos do Laser em relação as especificações do fabricante e dos cálculos no anexo

Local de Trabalho	Atividade	Laser	Especificações do óculos de proteção	Fabricante / data de compra
Sala A207	Tratamento de superfície de objetos de arte	Soliton LT 300	D LB5 + IR LB7 900 - 1100	Soliton 15.2.2014

Tabela 3: equipamentos de proteção individual

**Funcionários(as) envolvidos:**

Na área de laser é autorizado a entrar pessoas da segurança de laser e pessoas da unidade treinada. Essas pessoas sabem o código numérico para a porta para a área laser e o gabinete com a chave de ignição para o laser. No momento 30.07.2015 as seguintes pessoas estão autorizadas a ter esse acesso:

Frank M.

Lutz M.

Emil S.

Klaus R.

Susanne S.

**Técnicos de segurança laser:**

Susanne S.

Frank M., Representante

**Risco de lesões oculares do usuário e do pessoal auxiliar na área laser****Medidas de proteção técnicas:**

*Blindagem da área laser:* O laser está localizado em uma sala fechada, sem janelas. A fechadura da porta é protegida com uma cortina. A cortina é localizada em 2 metros de distância do equipamento laser. O cálculo no apêndice mostra o nível de proteção AB 6 para a cortina. A área inteira é a sala de laser. A área laser é livre de superfícies, áreas e paredes refletoras.

*Delimitação da área laser:* É assegurado que qualquer entrada aleatória na sala é impossibilitada. A porta pode apenas ser aberta por fora com um código numérico. Apenas pessoas autorizadas conhecem o código. Adicionalmente as portas são protegidas por cortinas. Dentro destas cortinas há porta-objetos com óculos de proteção, luvas de proteção...

*Identificação da área laser:* fora da sala laser há uma identificação de aviso. Está escrito "Atenção feixe de laser". Adicionalmente há nota para o uso de óculos de proteção laser e uma luz automática que é ativada quando o laser estiver em uso.



*Paredes refletoras difusas na sala laser:* parede, teto e o chão tem uma superfície reflexiva dispersora.

Botão de emergência: diretamente na área de trabalho há um botão de paragem de emergência e na entrada da sala da sala outro botão também de emergência.

*Bloqueio de segurança:* o laser se encontrar em uma estrutura, nessa estrutura há um bloqueio de segurança em que o laser é desligado automaticamente quando há a tentativa de abri-la.

Chave-Interruptor: o equipamento laser está equipado com um interruptor. A chave do interruptor é mantida no armário com um cadeado.

Alarme de alerta: se encontra no dispositivo e na porta de entrada para a área laser, a qual automaticamente se acende quando o laser estiver sendo utilizado

Barreira laser: através de um **laserhandstück** mantém a radiação laser ligada, o feixe laser estará ligado apenas pelo tempo e que o **handstück** seja mantido na posição, uma vez que o **handstück** seja retirado, a radiação cessa.

**[PERGUNTA: Qual seria a tradução adequada para “handstück”?]**

### **Medidas Organizacionais:**

- Ensino e instrução de empregados: Cada funcionário deve ser treinado no início de sua atividade sobre os perigos e as medidas de segurança na área de trabalho do laser e também devem ser instruídos sobre a operação do equipamento laser. A instrução será repetida a cada ano em janeiro. Com as mudanças no local de trabalho, será feito a instrução dos funcionários imediatamente. O empresário está no dever de instruir e liderar os protocolos relativos a instrução.

-Técnico de segurança laser: O empresário da empresa nomeou Susanne S. como responsável pela proteção da segurança laser e como substituto Frank M. Eles foram nomeados como responsáveis por todas questões relativas à segurança laser. Ambos concluíram com êxito um curso aprovado com formação em técnico de segurança laser em 2014.

- Restrição de trabalho para pessoas menores de 18 anos de idade: todos funcionários relacionados com o trabalho de laser foram informados que o trabalho de qualquer adolescente menor de 18 anos são proibido na empresa.

- Acesso restrito: a área laser é restrita apenas as pessoas treinadas e que estão listados na avaliação de risco. Apenas eles sabem o código numérico da porta da frente para a área laser e o gabinete com a chave do laser.
- Consideração de pessoas vulneráveis: os trabalhadores foram informados que devem consultar o médico da empresa caso apresentem uma foto sensibilidade.
- Objetivo do feixe: É usado com uma produção de <1mW Classe 2. Os funcionários afetados foram instruídos a não olhar para o raio direto. Se o feixe alvo direto ou refletido golpear o olho, o empregado está ciente de que a duração do feixe no olho não pode ultrapassar 0,25 s. Se o feixe ficar muito brilhante, de modo a provocar cegueira temporária, os trabalhos devem ser interrompidos.

#### **Medidas de proteção pessoais:**

- Óculos de proteção laser: O fabricante forneceu um óculos de proteção D LB6 + IR BB7. Os cálculos sobre o nível de proteção ficam em anexo. A determinação exata se encontra na tabela 3. Para o alvo do feixe não há necessidade de óculos de segurança
- Luvas de proteção: O uso de luvas de proteção deve ser usadas de modo a proteger a mão contra possíveis danos pela radiação laser. As luvas são fornecidas pelo fabricante do dispositivo.

Empresa / Firma:		Área de trabalho / atividade: Limpeza de superfície com Nd:YAG-Laser						
Firma de restauração 12105 Berlin		Feito por: Susanne S.					Data: 30.07.2015	
		Responsável: Anne M.						
	Ameaça	Sim / Não	Comentários / Medidas	Implementação		Feito	Revisão	
				Quem?	Até quando?	Assinatura / Data		
	Riscos na área de laser  de olhos e pele do usuário e do assistente		<b>Técnicas:</b> Blindagem radiação laser Delimitação da área laser Marcação da área laser Paredes Claras refletoras difusas Parada de emergência Bloqueio de segurança Interruptor com chave Dispositivo de aviso de emissão Barreira do feixe (strahlfänger) <b>Organizacionais:</b> Intrusão da equipe Ordens do técnico de segurança laser por escrito Restrições de emprego para menores de 18 anos Instruções de operação Área restrita Consideração de pessoas vulneráveis Feixe de mira <b>Pessoais:</b> Óculos de proteção laser Luvas de proteção laser					

Nr.	Perigos / Encargos	Sim / Não	Comentário / Medidas de proteção	Implementação		Feito	Revisão	
				Quem?	Até quando?	Assinatura / Data		
7,5	Pode haver cegeira temporária através da radiação laser?	Sim	O foco do laser (classe 2) pode ter ser visto através de um reflexo direto em uma superfície lisa. Os funcionários são aconselhados a se proteger através de uma reação de afastamento					
5,1	Ato de evitar risco de incêndio e explosão	Sim	Para a aplicação da equipamento laser materiais inflamáveis não são necessários. Os funcionários são intruídos a não levar qualquer um desses tipos de materiais para a sala.					
3,2	Proteção contra substâncias perigosas	Sim	Ao remover a superfície e surgir uma poeira ou vapor, o dispositivo deve estar ligado a sucção. Além disso, máscaras de pó deve ser usadas, as quais são fornecidas pelos fabricantes.					

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MESCHÉDE, dieter. Optics, Lights and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics. 2.ed. University of Bonn, Germany:Wiley-VCH, 2007. 572p.
- [2] Disponível em <<http://www.sbcd.org.br/procedimentos/98>>. 2 de setembro de 2015
- [3] NIEMZ. Markhof. Laser-Tissue Interactions: Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. 3.ed. University of Heidelberg, Germany: Springer 2004, 2007. 316p.
- [4] HALLIDAY, RESNICK, WALKER, jearl. Fundamentos de Física: Volume 4 Óptica e Física Moderna. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 438p
- [5] Disponível em <<http://www.icnirp.org/en/frequencies/index.html>>. 2 de setembro de 2015.
- [6] GORDDON, gould. The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: In Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan. 128p.
- [7] SVELTO, orazio. Principle of Lasers. 5.ed. Southampton, England: Springer, 2010. 625p
- [8] CSELE, mark. Fundamentals of Light Sources and Lasers, 1.ed. Hoboken, New Jersey: Willey, 2004. 349p
- [9] ZILIO, sérgio. Óptica Moderna: Fundamentos e Aplicações. IFSC-USP. 315p
- [10] EICHLER, jürgen. Laserkurs: Laserschutzbeauftragte.

- [11] S. C. SINGH, H.B. ZENG, CHUNLEI GUO, WEIPING CAI. Nanomaterials: Processing and Characterization with Lasers. Wiley-VCH. 810p.
- [12] YARIV, amnon. Quantum Eletronics.3.ed. California Institute of Technology, Willey, 1967, 1975, 1989. 693p.
- [13] COX, ben. Optics in Medicine: Introduction to Laser-Tissue Interactions.2013. 64p
- [14] AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION. Richtlinie 2006/25/EG des europäischen parlaments und des rates: *Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)*, Alemanha, 2006. 22p
- [15] BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ. Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) Alemanha, 1996. 11p.
- [16] BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ. Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV). Alemanha, 2015. 51p.
- [17] BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ. Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - OStrV). Alemanha, 2010. 7p.
- [18] Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung. TROS Inkohärente Optische Strahlung; Teil: Allgemeines. 2013. 20p
- [19] Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung. TROS Laserstrahlung; Teil 1:Beurteilung der Gefährdung durch Laserstrahlung. 2015. 31p

- [20] Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung. TROS Laserstrahlung; Teil 2: Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung. 2015. 57p
- [21] Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung. TROS Laserstrahlung; Teil 3: Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch Laserstrahlung. 2015. 25p
- [22] BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALLES; Verordnung zur Arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV). 2013. 33p
- [23] Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)
- [24] BGR 104. Explosionsschutz-regeln: Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung. 2007. 330p.
- [25] BGR 192. Einsatz von Augen- und „Gesichtsschutz, 2001. 42p.
- [26] BGI 5092. Auswahl und Benutzung von Laser-Schutz- und -Justierbrillen
- [27] BGI 5031. Umgang mit Lichtwellenleiter- Kommunikations- Systemen (LWKS).
- [28] BGI 5007. Laser-Einrichtungen für Show- oder Projektionszwecke“.
- [29] DIN EN 60825-1:2007
- [30] BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES – Arbeitsschutz, Laserstrahlung – Technische Regeln.
- [31] BEHÖRDE FÜR GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, AMT FÜR ARBEITSCHUTZ. Künstliche Optische Strahlung: Eine Handlungshilfe für die Gefährdungsbeurteilung. Hamburg, Alemanha .2014, 26p